

VOIMALAITOKSEN PUTKILINJOJEN KARTOITUS JA ENERGIAVIRTOJEN SEURANTA

Case: Yritys X:n savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden
putkilinjat

Tiivistelmä

Tekijä Nieminen, Jenni	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Valmistumisaika Kevät 2020
	Sivumäärä 48	
Työn nimi Voimalaitoksen putkilinjojen kartoitus ja energiavirtojen seuranta Case: Yritys X:n savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden putkilinjat		
Tutkinto Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyö tehtiin Yritys X:n toimeksiannosta. Toimeksianto pohjautuu tarpeeseen tietää virtaavaan veteen sitoutuneiden energiamäärien suuruudet ja tehostaa energia-tehokkuuden seurantaa.</p> <p>Työssä kartoitettiin putkilinjat voimalaitoksen savukaasupesureiden ja vaneritehtaan hautomoaltaiden välillä, tarkistettiin linjojen putkikoot, tehtiin laskenta-arvio energiavirroista olemassa olevien mittausten, tiettyjen olettamusten sekä niiden mittausten pohjalta mitä oli mahdollista toteuttaa. Arvioidut energiavirrat koostettiin Sankey-diagrammeiksi. Lisäksi tuli tehdä ehdotelma, mitä mittauksia putkilinjoihin tulee lisätä ja mitä suureita mittareilla tulisi mitata ja mistä kohtaa, jotta energiavirrat saadaan osaksi tiedonkeruujärjestelmää. Toimeksiantajan toiveena oli osana työtä piirtää informatiivisempi putkisto- ja instrumentointikaavio (PI-kaavio) tarkastelun kohteena olevasta vesikiertoprosessista nykyisen pelkistetyn PI-kaavion tilalle.</p> <p>Työn tutkimusmenetelminä käytettiin painettua ja sähköistä lähdemateriaalia sekä toimeksiantajan tietokannasta löydettyä materiaalia, kuten olemassa olevia PI-kaaviokuvia ja PowerPoint- ja Word-tiedostoja. Voimalaitoksen ja vaneritehtaan tiloissa tehtiin kartoituskiertoja, joiden yhteydessä selvitettiin muun muassa putkilinjojen reitit, putkikoot, lämpötila-arvoja sekä olemassa olevat mittarit ja muut komponentit. Työssä perehdyttiin kirjallisuuden avulla varsin laajasti voimalaitos- ja prosessitekniikkaan, tarkastelun kohteena olevan voimalaitoksen laitteistoon ja prosesseihin sekä virtaavan aineen mittauksiin ja laskukaavoihin, jotta energiasisältö on selvitettävissä. PI-kaavio toteutettiin AutoCAD Plant 3D (Student License) -piirto-ohjelmistolla ja siihen sisältyvällä P&ID-suunnittelutyökalulla. Sankey-diagrammit luotiin SankeyMATIC-verkkotyökalulla.</p> <p>Työn tuloksena saatiin aikaiseksi teoriapainotteinen tutkimusraportti, tietosisällöltään kattavampi PI-kaavio nykyisestä veden ohjauksesta savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välillä sekä lämpöenergiavirtoja kuvaavat Sankey-diagrammit. Osa työn tuloksista on toimitettu erillisinä liitetiedostoina toimeksiantajalle, eivätkä ne ole nähtävissä osana tätä opinnäytetyöraporttia.</p>		
Asiasanat savukaasupesuri, hautomoallas, energiavirrat, putkisto- ja instrumentointikaavio (PI-kaavio)		

Abstract

Author Nieminen, Jenni	Type of publication Bachelor's thesis	Published Spring 2020
	Number of pages 48	
Title of publication Research of power plant's pipelines and monitoring of energy flows Case: The pipelines of the flue gas scrubbers and soaking ponds at the Company X		
Name of Degree Bachelor of Engineering, Environmental Technology		
<p>Abstract</p> <p>This thesis was made as an assignment given by Company X. The assignment is based on the need to know the amount of energy bound to flowing water and to improve the monitoring of energy efficiency.</p> <p>The task was to survey the pipelines between the power plant's flue gas scrubbers and the log soaking ponds of the plywood mill, to check the sizes of the pipelines and to make an estimated calculation of the energy flows based on the existing measurements, certain assumptions and the on-site measurements that could be executed. The estimated magnitudes of energy flows had to be compiled into a Sankey diagram. In addition, a proposal had to be made on what kind of measurements should be added to the pipelines and what values should be measured with what measurement instrument and at what point in order to integrate energy flows into the data collection system. As a part of the work, the client company wanted a more informative piping and instrumentation diagram (P&ID) of the water cycle process under the review to be drawn, to replace the current plain P&ID diagram.</p> <p>The research methods used were printed and electronic sources as well as material found in the company's database such as existing P&ID diagrams and PowerPoint and Word documents. In connection with the survey tours carried out at the power plant and plywood mill area, the routes and the sizes of the pipelines, temperature values and the existing measurement instruments and other components were listed. By using the source literature, the power plant and process technology, the examined equipment, and processes of the power plant as well as the measurements and calculation formulas of the flowing fluid were studied in order to determine the energy content. The P&ID diagram was implemented with AutoCAD Plant 3D (Student License) and P&ID drawing software. Sankey diagrams were created with the SankeyMATIC web tool.</p> <p>The outcome of the thesis was a theory-focused research report, a more comprehensive P&ID diagram of the current water route control between flue gas scrubbers and log soaking ponds and two Sankey diagrams describing thermal energy flows. Some of the results of the work have been submitted as separate attachments to the client.</p> <p>Keywords</p> <p>flue gas scrubber, log soaking pond, energy flows, piping and instrumentation diagram (P&ID)</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	VASTAPAINVOIMALAITOS	2
2.1	Höyryn hyödyntäminen teollisuuskäytössä	2
2.2	Vastapainelaitoksen peruspiirteet	2
2.3	Höyryvoimalaitoksen toimintaperiaate.....	2
2.4	Kattilatyytit	4
2.5	Yleisimmät puuperäisten polttoaineiden polttotekniikat	5
2.5.1	Leijukerros poltto	6
2.5.2	Arinapoltto	7
2.6	Poltin poltto.....	9
3	SAVUKAASUPESURIT	11
3.1	Savukaasujen koostumus	11
3.2	Savukaasujen puhdistus	11
3.3	Hiukkaserottimet.....	12
3.3.1	Multisykloni	13
3.3.2	Sähkösuodatin.....	14
3.4	Savukaasupesurin käyttötarkoitus	14
3.5	Savukaasupesurin perustoimintaperiaate	15
3.6	Hukkalämpö ja lämmöntalteenotto savukaasuista lämpöpumpun avulla	17
4	ENERGIAVIRTOJEN SEURAAMINEN JA MITTAUKSEN MAHDOLLISTAMINEN ...	19
4.1	Energiavirtojen mittaus virtaavasta aineesta	19
4.2	Mittausten luonne	20
4.3	Mittausten laadun seuranta.....	22
4.4	Energiatase	22
4.5	Sankey-diagrammi.....	23
5	PI-KAAVIO.....	25
5.1	PI-kaavioiden merkitys.....	25
5.2	PI-kaavioiden tietosisältö	25
5.3	PI-kaavion laadinta	26
6	TOTEUTUSMENETELMÄT	27
6.1	Tiedonhankintamenetelmät.....	27
6.2	Työssä käytetyt laskukaavat ja mittaukset	27
6.3	PI-kaavion ja Sankey-diagrammin laadinta	30

7	TARKASTELUSSA OLEVA VOIMALAITOS JA SAVUKAASUPESURIT	31
7.1	Energiantuotanto	31
7.2	Savukaasupesurit	31
7.3	Savukaasupesureiden lauhdevesien laatu ja käsittely	32
7.4	Kierrätysvesipumput	32
7.5	Voimalaitoksen päästöt ja PIPO-asetus	33
8	SAVUKAASUPESUREIDEN JA HAUTOMOALTAIDEN VÄLINEN VESIKIERTO	35
8.1	Hautomoaltaiden merkitys	35
8.2	Hautomoaltaiden vesien nykyinen ohjaus	36
8.3	Putkistoyhteydet hautomoaltaiden ja savukaasupesureiden välillä	37
8.4	Vesikierron energiavirrat	38
8.5	Vesikiertoprosessin toteutus tulevaisuudessa	39
9	TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI	40
9.1	Putkilinjakartoitukset ja mittaukset	40
9.2	Virtaavan veden sisältämän energiamäärän arviointi	43
9.3	Mahdollisten mittauspisteiden sijoittuminen	44
9.4	Sankey-diagrammi	45
9.5	PI-kaavio	45
10	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	46
	LÄHTEET	49

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Yritys X:n toimeksiannosta. Opinnäytetyö käsittelee voimalaitoksen savukaasupesureiden ja vaneritehtaan hautomoaltaiden välisten putkilinjojen vesikiertoa. Hautomoaltaiden ja savukaasupesureiden toimintaan liittyy olennaisesti myös muita vesikiertoprosesseja, kuten vaneritehtaiden viilunkuivaajien lämmöntalteenottojärjestelmien ja hautomoaltaiden välillä kiertävä lämmin vesi, mutta ne rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle.

Voimalaitoksen savukaasupesureiden lauhdevettä johdetaan vaneritehtaan hautomoaltaisiin tai viemäriin lämmöntarpeen mukaan. Putkissa virtaavan veden sisältämää energiamäärää ei tiedetä, sillä sitä ei varsinaisesti mitata missään kohtaa. Savukaasupesureiden lämmintä lauhdevettä ohjaaviin putkilinjoihin on suunnitelmissa hankkia mittauslaitteistoa, jotta energiamäärät saadaan osaksi tiedonkeruuta ja energiavirtoja voidaan hallita entistä paremmin. Energiavirtojen mittaus ja seuranta kuuluu osaksi yritysten energiatehokkuustoimenpiteitä.

Työn tarkoituksena on arvioida putkilinjoissa virtaavan veden energiamäärät tietyin oletuksin ja niiden mittausten perusteella, mitä työn puitteissa oli mahdollista tehdä ja selvittää, sekä ehdotetaan mahdollisten mittauspisteiden sijainti ja mitä suureita putkilinjoista tulisi mitata. Toimeksiantajan toiveena oli koostaa selvitetystä energiamäärästä Sankey-diagrammiksi kutsuttu kaaviokuva sekä luoda nykyistä olemassa olevaa kattavampi putkisto- ja instrumentointikaavio (PI-kaavio) savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välisestä vesien ohjauksesta. Varsinaisten toimeksiantotehtävien lisäksi tässä opinnäytetyössä kerrotaan yleisellä teoriatasolla vastapainehöyrylaitoksen ja savukaasupesureiden toiminnasta, höyrykattiloista ja polttotekniikoista, vaneritehtaan hautomoaltaista, energiavirtojen mittauksen mahdollistamisesta sekä PI-kaavioiden laadinnasta.

2 VASTAPAINOVOIMALAITOS

2.1 Höyryn hyödyntäminen teollisuuskäytössä

Teollisuudessa höyryn hyödyntäminen lämmönsiirtoaineena tuotantoprosesseissa on hyvin suosittua korkean hyötysuhteen takia. Höyryn lämpökapasiteetti ja lämmönvarastointikyky ovat suuria. Kun höyry lauhtuu vedeksi, vapautuu suuri määrä lämpöenergiaa, joka on mahdollista hyödyntää esimerkiksi jonkin prosessin tai tilan lämmityksessä. Höyryn avulla suuria lämpötehoja saadaan helposti siirretyksi suoraan lämmitettävään kohteeseen ja lämmitys tapahtuu nopeasti. Höyryn käytön etuihin lukeutuu myös alhaiset käyttökustannukset. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2008, 63, 80.)

Höyryn käytön haittapuolia ovat muun muassa korroosio-ongelmat, suurehko huollon tarve ja tarve vedenkäsittelylle. Energiaa menetetään herkästi ulospuhalluksien mukana, joten lämmöntalteenottojärjestelmien hankinta on poikkeuksetta kannattavaa. (Huhtinen ym. 2008, 80.)

2.2 Vastapainelaitoksen peruspiirteet

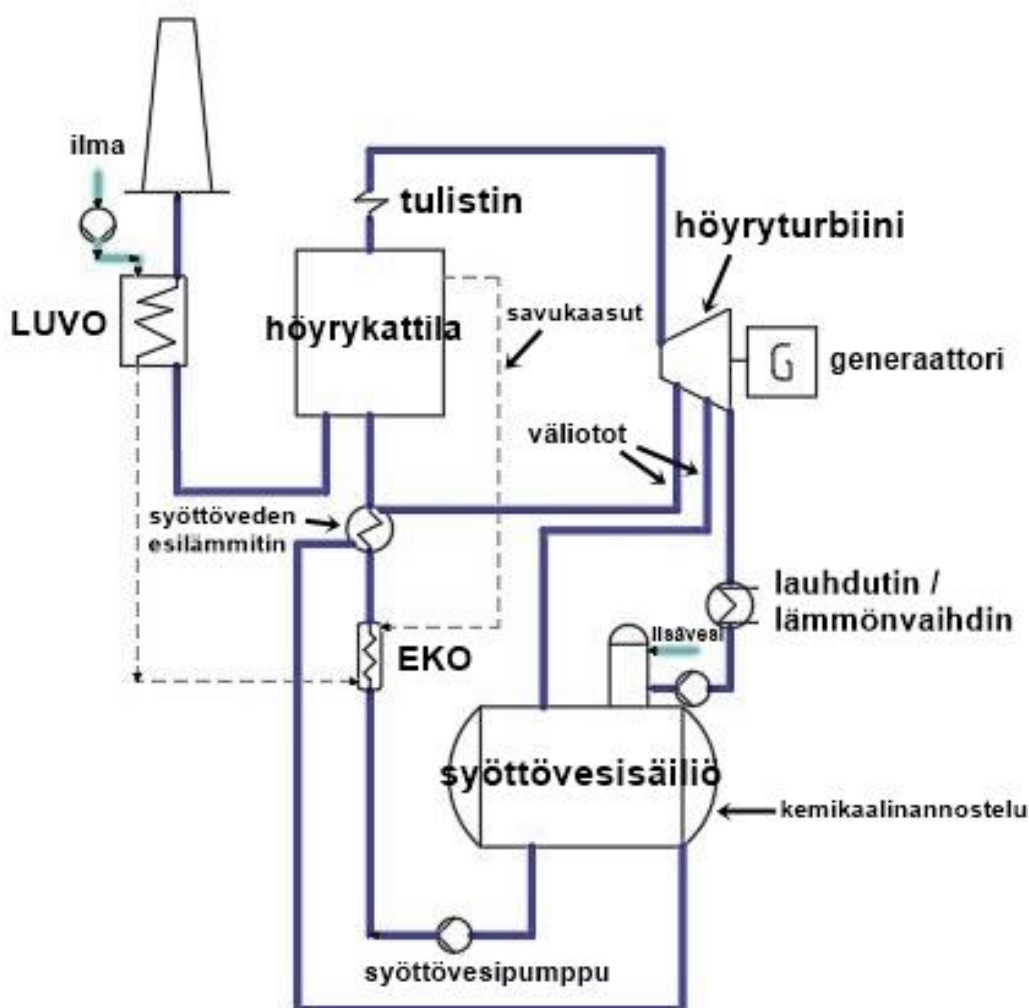
Vastapainevoimalaitos on höyryvoimalaitos ja tyypillisesti sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos (CHP, combined heat and power). Vastapainevoimalaitokset sijoittuvat yleensä teollisuuslaitosten yhteyteen, joissa on korkea prosessihöyryn tarve. Tällaisia toiminnanharjoittajia ovat esimerkiksi puunjalostusteollisuus ja kemianteollisuus. Yleensä teollisuuslaitokset käyttävät omasta tuotannosta peräisin olevia polttoaineita, kuten puunkäsittelystä syntyvää kuori- ja puujätettä, mutta jonkin verran joudutaan käyttämään ostopolttoaineita, kuten turvetta, hiiltä tai polttoöljyä. (Aho, Hietämäki, Hyytiä & Jalovaara ym. 2003, 20.)

Voimalan mitoitus tapahtuu höyryntarpeen mukaan, mutta lämmityshöyryn valmistuksen yhteydessä on kannattavaa tuottaa myös sähköä sivutuotteena, mikäli höyryä kuluttava teollisuuden harjoittaja tarvitsee prosesseissaan lämmityshöyryä ympäri vuoden lähes keskeytymättä. Teollisuusvoimalaitosten hyötysuhde, eli tuotetun sähkön ja prosessihöyryn suhde käytettyyn polttoaine-energiaan on yleensä korkea, tyypillisesti luokkaa 80-85 %. (Aho ym. 2003, 20.)

2.3 Höyryvoimalaitoksen toimintaperiaate

Höyryvoimalaitoksen tarkoituksena on tuottaa höyrykattilaan syötetystä vedestä korkeapaineista kylläistä vesihöyryä, joka yleensä myös tulistetaan. Höyrykattilavoimalaitoksen peruskomponentit ovat syöttövesisäiliö, syöttövesipumppu, kattila, höyryturbiini, tulistin, generaattori, lauhdutinpumppu ja lauhdutin. Höyryvoimalaitoksien yhteydessä tarvetta on

myös polttoaineenkäsittelylaitteistolle (muun muassa silot ja kuljettimet), savukaasujen puhdistuslaitteille, vedenkäsittelylaitteistolle sekä automaatio- ja säätöjärjestelmille. Höryvoimalaitoksen tärkeimpiin pumppuihin lukeutuvat lauhde-, syöttövesi- ja jäähdytysvesipumput, kemikaalien annostelupumput ja turbiinien voiteluöljypumput. (Huhtinen ym. 2008, 133.) Tässä työssä ei käsitellä voimalaitoksen pumppuja tämän enempää. Oheisessa kuvassa on esitetty tavanomaisen höryvoimalaitoksen prosessikokonaisuus komponentteineen (kuva 1).



Kuva 1. Höryvoimalaitoksen periaatekaavio (mukailtu Perttula 2000,182)

Palamisilman esilämmitin (luvo, luftvorvärmern) ja tuloveden esilämmitin eli ekonomaiseri (eko, ekonomizer) ovat vesi-höyrypiirin lämmönsiirtimiä. Luvon avulla polttoaineen kosteuspitoisuutta saadaan pienennettyä, mikä nopeuttaa polttoaineen syttymistä ja palamista. Ekonomaiserialla syöttövetä lämmitetään lähemmäksi höyrystymislämpötilaa hyödyntämällä savukaasuihin sitoutunutta lämpöenergiaa. Samalla kattilasta poistuvien savukaasujen lämpötila saadaan laskemaan. (Timonen 2009.)

Höyrykattilassa palavaan polttoaineeseen sitoutunut kemiallinen energia muuttuu savukaasujen lämpöenergiaksi. Tämä energia hyödynnetään kattilaan syötettävän veden lämmitykseen, jolloin energia sitoutuu höyryn paine- ja lämpöenergiaksi. Veden höyrystymislämpötila on riippuvainen paineesta ja tietyssä tilavuudessa ja lämpötilassa veden höyrstyminen saavuttaa korkeimman arvonsa. Kylläistä höyryä saadaan, kun kaikki se vesi on höyrystynyt, mitä tietyssä lämpötilassa on mahdollista höyrystää. Kuumentamalla kylläistä höyryä tilassa, jossa ei ole nestettä, saadaan aikaan tulistettua höyryä. (Timonen 2009.)

Osa höyryn paine- ja lämpöenergiasta muuntuu turbiinissa mekaaniseksi energiaksi pyörittämään turbiinia ja edelleen siihen kytkettyä generaattoria, jolla saadaan tuotettua sähköä. Turbiinista ulos virtaava höyry muutetaan takaisin nestemäiseksi vedeksi vesijäähdytteisessä lämmönsiirtimessä. Vastapainevoimalaitoksissa turbiinin läpi virrannut höyry johdetaan teollisuuden höyryä kuluttaviin kohteisiin ja vain osa höyrystä palautetaan lauhdeena kiertoon voimalaitokseen. Lauhdepumppu pumppaa höyryn lauhtumisessa vapautuva lämmön sitoneen lauhdeveden kaukolämmönsiirtimeltä syöttövesisäiliöön, joka toimii kattilaan syötettävän veden varaajana. Syöttövesipumpulla vettä pumpataan syöttövesisäiliöstä edelleen kattilaan höyrystettäväksi. (Timonen 2009.)

2.4 Kattilatyypit

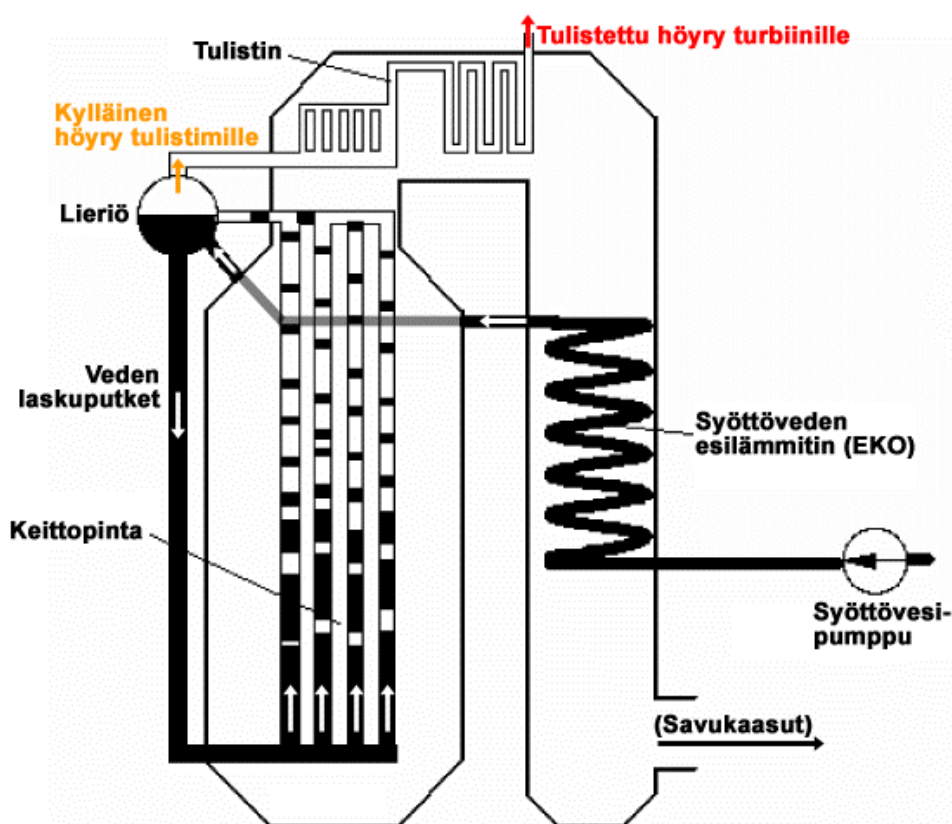
Höyrykattilat jaotellaan vesihöyrypiirien suhteen yleisesti tuliputkikattiloihin ja vesiputkikattiloihin. Tuliputkikattiloita käytetään matalapaineisen prosessihöyryn tuotannossa teollisuuskohteissa, joissa höyryn tarve on pientä. Savukaasut virtaavat tulitorvessa ja sitä seuraavien tuliputkien sisäpuolella. Vesi höyrystyy tuliputkien ulkopuolella. Yleensä kiinteää polttoainetta käyttävät voimalaituskattilat ovat vesiputkikattiloita korkeiden lämpötilojen ja painelukemien takia. Vesi virtaa vesiputkien sisäpuolella ja savukaasut näiden putkien ulkopuolella. Vesiputkikattilat jaetaan pakkokierto-, luonnonkierto- ja läpivirtauskattiloihin. (Aho ym. 2003, 22.)

Pakkokierto- ja läpivirtauskattiloissa veden liikkuminen putkistoissa nesteinä ja höyrynä mahdollistetaan pumppujen muodostaman paineen avulla. Luonnonkiertokattilassa vesi liikkuu putkistossa tulipesän ympärillä veden ja höyryn välisen tiheyseron vaikutuksesta. Höyrykattila toimii lämmönsiirtimenä, jossa polttoaineiden palamisen tuloksena putkistossa virtaava vesi lämpenee ja lopulta höyrystyy ja tulistuu haluttuun lämpötilaan. (Timonen 2009.) Tässä työssä tutustutaan tarkemmin luonnonkiertokattilan toimintaan.

Luonnonkiertokattila

Syöttöveden paine nostetaan syöttövesipumpulla kattilassa vallitsevaan paineeseen. Ekonomaiseri lämmittää syöttövettä savukaasuihin sitoutuneella lämpöenergialla ennen

pumppaamista lieriöön. Lieriössä esilämmitetty vesi erotetaan vedeksi ja höyryksi tiheys-eron avulla. Lieriöstä vesi valuu painovoiman avulla putkia pitkin höyrystimeen. Höyrystimessä lämpö siirtyy tulipesästä veteen ja saa veden höyrystymään osittain. Lämpöenergiasta suurin osa menee veden höyrystämiseen, jolloin lämpötila ei pääse nousemaan paljoa. Kiehuva vesi nousee putkia pitkin takaisin lieriöön, jossa tapahtuu kylläisen vesihöyryn ja veden erotus. Erottunut vesi virtaa takaisin höyrystimeen uudelleen kierto. Syntynyt kylläinen vesihöyry johdetaan tulistimille, jossa höyryn lämpötilaa nostetaan ilman paineen nostamista. Tulistetusta höyrystä saadaan enemmän sähköenergiaa kuin kylläisestä höyrystä. (Timonen 2009.) Luonnonkiertokattilan rakenne on esitetty seuraavassa kuvassa (kuva 2).



Kuva 2. Luonnonkiertokattilan rakenne (Know Energy 2019)

2.5 Yleisimmät puuperäisten polttoaineiden polttotekniikat

Polttolaitteiden tarkoituksena on saada polttoaineet palamaan, ja niihin sitoutunut kemiallinen energia vapautumaan lämpöenergiaksi. Puuperäisille kiinteille polttoaineille soveltuvia polttotekniikoita ovat erityisesti leijukerros poltto ja arinapoltto. Polttolaitteistojen toiminnan käynnistymistä eli ylösajoa varten kattilat varustetaan käynnistyspolttimilla, jotka toimivat yleensä kevytöljyllä tai maakaasulla. (Huhtinen ym. 2008, 35-37.)

2.5.1 Leijukerros poltto

Leijukerros poltossa polttoaineen palaminen tapahtuu pediksi kutsutussa kerroksessa, jota alapuolelta puhallettava ilmavirtaus leijuttaa. Kiinteänä petimateriaalina käytetään yleensä hiekkaa. Polttoaine annostellaan kattilan tulipesään syöttölaitteistoilla ja se sekoittuu tulipesässä varsin nopeasti petimateriaaliin ja kuumenee samalla palamislämpötilaan. (Huhtinen ym. 2008, 36.)

Leijukerros poltolla saavutetaan hyvä palamishyötysuhde, sillä kaasua ja kiintoainetta sekoittuvat toisiinsa hyvin ja leijupedillä on suuri lämpökapasiteetti. Tämä mahdollistaa huonolaatuisten ja kosteiden polttoaineiden polttamisen ja samassa kattilassa voidaan polttaa hyvinkin erilaisia polttoaineita. Palamislämpötilat ovat alhaiset (noin 800-950°C) ja tasaiset, ja palaminen on vaiheistettua, jolloin typenoksidipäästöt jäävät yleensä vähäisiksi. Kattilan vesi-höyrypiiriin lämpö siirtyy leijupedistä hyvin. (Aho ym. 2003, 33.)

Leijukerros poltto jakautuu erilaisiin tyyppeihin polttotavan ja leijukattiloiden pedin käyttäytymisen suhteen. Leijupedit voivat olla kiinteitä, kuplivia, turbulentteja tai kiertopetejä. Leijukattilat jakautuvat kerrosleijukattiloihin ja kiertopetikattiloihin. Kattiloiden leijupoltotavat eroavat toisistaan leijutusnopeuden suhteen. (Aho ym. 2003, 34.)

Kerrosleijupoltto

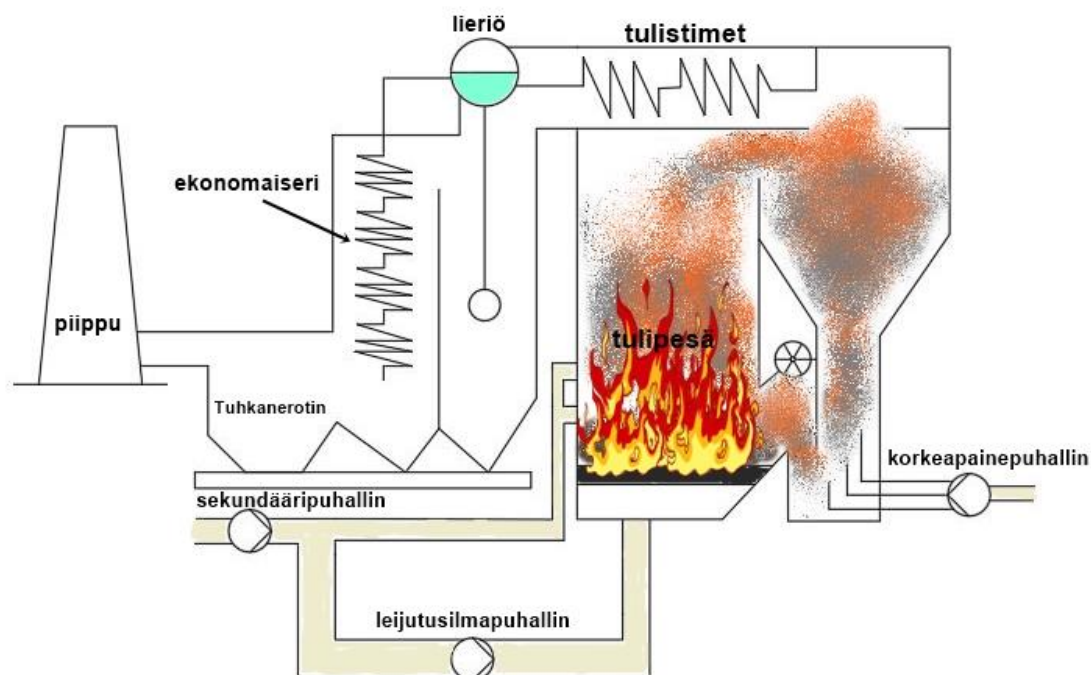
Kerrosleijukattilassa puhallusilma syötetään alhaalta päin leijukerrokseen sopivalla nopeudella. Hiekkakerros alkaa leijua, mutta ei lähde liikkeelle savukaasujen mukana. Kerrosleijukattilassa hiekan raekoko on 1-3 mm ja leijutusnopeus 0,7-2 m/s. Hiekkakerros on erotettavissa kattilan pohjalla. (Timonen 2009.) Kosteat polttoaineet soveltuvat hyvin kerrosleijupolttoon, sillä kattilan tulipesässä polttoaineen hautautuessa kuumaan hiekkaan, se kuivuu ja syttyy lopulta palamaan (Huhtinen ym. 2008, 36).

Kiertopetipoltto

Kiertopetikattilan rakenteeseen kuuluu tulipesä ja siihen liitetty kiertävä petimateriaali ja palamattomat karkeat hiukkaset tulipesän pohjalle takaisin palauttava sykloni. Savukaasukanavassa sijaitsee pääosa lämmönsiirtimistä, joita ovat höyrystin, tulistin sekä veden ja palamisilman esilämmittimet. Kiertopetikattiloiden vedenkiertona on Suomessa yleisesti luonnonkiertojärjestelmä. Vastapainehöyrylaitoksissa halutut tuorehöyryn paineet mahdollistavat luonnonkiertoisen vesikierron. (Huhtinen ym. 2008, 97.)

Kiertopetipoltossa käytetään suurempia leijutusnopeuksia ja hienojakoisempaa petimateriaalia kuin leijupetipoltossa. Leijutusnopeus vaihtelee 3-10 m/s välillä ja hiekan raekoko vaihtelee 0,1-0,5 millimetrin välillä. Kiertopetikattilassa alhaalta päin syötetty ilmavirta on

niin voimakas, että polttoaine, tuhka ja petimateriaalina käytetty hiekka kulkeutuvat leijuvan ilmavirran ja savukaasujen mukana poistuen tulipesästä (kuva 3). Tulipesästä puhalluksen mukana poistuneet kiinteät hiukkaspattikkelit ja palamattomat polttoainejäämät erotetaan savukaasuvirrasta syklonissa ja palautetaan takaisin tulipesän alaosaan uudelleen kiertoon. Tulipesän ylempiin osiin syötetään tarvittaessa lisäilmaa säätämään palamista ja siitä syntyviä päästöjä. (Perttula 2000, 177.)



Kuva 3. Esimerkkikuvaus kiertopetipoltosta ja komponenteista (mukailtu Tekijä X 2009 & Huhtinen ym. 2008, 99)

2.5.2 Arinapoltto

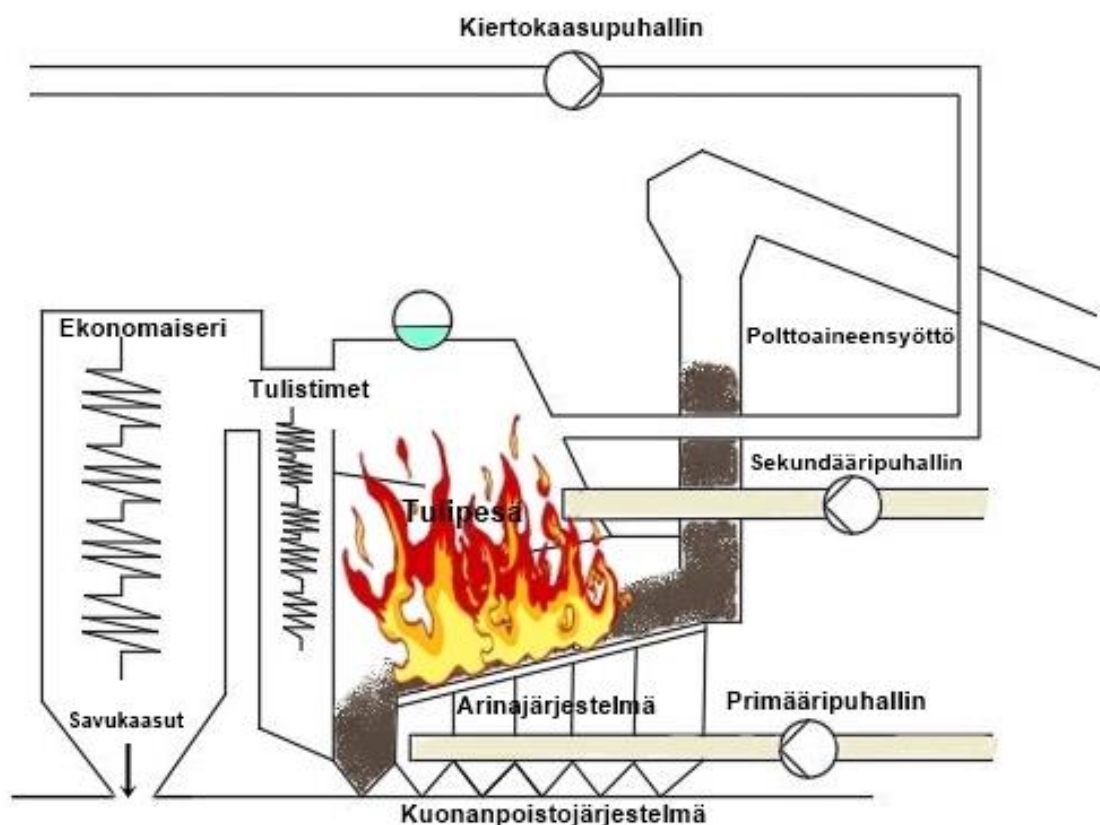
Arinapolttotekniikka soveltuu 2-30 MW:n tehoalueella toimiviin kattiloihin. Arinakattilassa polttoaine palaa joko paikallaan tai hitaasti liikkuvana kerroksena arinan päällä, joka on kattilan alaosaan sijoitettu polttoalusta. Palamisessa tarvittava primääri-ilma syötetään tulipesään arinan kautta. Tämä ilmavirta saa aikaan polttoaineen kuivatuksen ja palamisen. Palamisen säätämistä ja päästöjen minimointia varten sekundääri-ilmaa syötetään tulipesän ylempiin osiin. (Energiateollisuus 2012, 16.)

Arina jakautuu eri vyöhykkeisiin, joissa polttoaineen kuivuminen, lämmitys ja palaminen tapahtuvat. Polttoaine on yleensä kiinteässä ja murskatussa muodossa. Arinakattilaratkaisut soveltuvat erityisen hyvin hiilen, puun ja puujätteen polttamiseen. Teollisuuden jätelieville arinoita ei voida käyttää suuren tuhkapitoisuuden vuoksi. Arinapolton palamista on

vaikea hallita ja polttoaine palaa epätasaisesti, jolloin aiheutuu päästöjä ja kattila kuonaantuu herkästi. (Huhtinen ym. 2008, 35.)

Arinarakenteita on erityyppisiä: kiinteä tasoarina, kiinteä viisto- tai porrasarina, alasyöttöarina, mekaaninen ketjuarina ja valssiarina. Kiinteitä arinoita käytetään pienitehoisissa arinakattiloissa ja mekaanisia liikkuvia arinoita suurissa kattiloissa, joissa on yleensä käytössä myös automaattinen polttoaineen syöttö ja tuhkanpoisto. (Huhtinen ym. 2008, 35-36.)

Kiinteä viistoarina (kuva 4) on yleinen arinatyyppi puuperäisten polttoaineiden poltossa ja nykytekniikka mahdollistaa arinalla laadultaan vaihtelevien polttoaineiden polttamisen tehokkaasti. Polttoaine kulkee viistossa olevaa arinaa pitkin painovoiman ansiosta. Viistoarinaa seuraa tasoarina, jolla varmistuu polttoaineen loppuun palaminen. Porrasarina on viistoarina, jossa arinaraudat on sijoitettu porrasmaisesti toistensa päälle ja puhallusilmaa johdetaan vaakatasossa rautojen välistä. (Timonen 2009, 36.)



Kuva 4. Esimerkkikuvaus viistoarinapoltosta ja komponenteista (mukailtu Tekijä X 2009 & Renewa Oy 2015, 9)

2.6 Poltinpoltto

Polttinpolttotyyppijä on suunniteltu nestemäisille, kaasumaisille ja kiinteille polttoaineille. Polttimen tehtävä jokaisen polttotyyppin kohdalla on ilman ja polttoaineen sekoittaminen. Polttoaine sytty tulipesän lämmön vaikutuksesta ja palaa kaasuvirtauksessa, joka tulipesään muodostuu. (Timonen 2009, 32.) Tässä työssä perehdytään tiivistetysti pöly- ja öljypolttoon.

Pölypoltto

Pölypoltossa kiinteä ja kuiva polttoaine jauhetaan hyvin hienoksi jauheeksi, se kuljetetaan kantokaasun (ilma tai savukaasu) mukana polttimeen ja sitä kautta tulipesään. Palaminen tapahtuu hyvin nopeasti, jo muutamassa sekunnissa. Tarkoitus on saada jauhe palamaan kokonaan kattilassa sinä aikana, kun se viipyy tulipesässä. Palamisilma esilämmitetään, jotta syttyminen ja palaminen saadaan varmistettua. (Huhtinen ym. 2008, 93.)

Pölypoltto soveltuu kaikenkokoisille kattiloille, mutta kattilan tehon tulee olla suuri. Pölypolttimessa on oltava tasainen ja mahdollisimman täydellinen palaminen, jotta päästöt pysyvät alhaisina. Pölypolttoa käytetään Suomessa kivihiilen, turpeen ja puuperäisen polttoaineen poltossa. (Huhtinen ym. 2008, 93.)

Öljypoltto

Öljyä käytetään kalliin hinnan vuoksi nykyään lähinnä vara- ja käynnistyspolttoaineena. Öljy on helppo varastoida, sillä on korkea lämpöarvo ja sen käyttö on helppo automatisoida. (Aho ym. 2003, 42.)

Kevyet polttoöljyt ovat helposti juoksevia ja palavia tisleitä, joiden polttaminen ei vaadi monimutkaisia eikä kalliita laitteita. Kevyttä polttoöljyä on helppo käsitellä, se on välittömästi käyttövalmista ja sillä on hyvät palamisominaisuudet. Kevyen polttoöljyn tyypillinen käyttökohde on tilapäinen käyttö teollisuuden vara- ja käynnistyspolttoaineena. Kevyt polttoöljy haihtuu palavassa liekissä hyvin, koska se sisältää suurimmaksi osaksi tislautuvia komponentteja. Tämä takaa nopean palamisen ja varsin puhtaat savukaasut. Kevytpolttoöljyllä on hyvin pieni rikki- ja tuhkapitoisuus. (Aho ym. 2003, 42.)

Raskas polttoöljy on halvempaa kuin kevyt polttoöljy, mutta sen käsittely ja polttaminen vaativat kalliimmat laitteet sekä enemmän huoltoa ja asiantuntemusta. Raskas polttoöljy sopii parhaiten käytettäväksi kohteisiin, joissa kattilateho on vähintään 500 kW, kuten teollisuuden lämmöntuotannossa sekä kiinteistö- ja aluelämmityksessä. (Aho ym. 2003, 42.)

Öljy käsitellään ennen sen johtamista polttimelle korottamalla paine sopivaksi ja varmistamalla öljyn puhtaus suodattamalla. Öljypolttimet on jaoteltu hajotuspolttimiin ja

höyrystyspolttimiin sen mukaan, hajottaako öljypoltin öljyn pieniksi pisaroiksi vai kaasuttaako se öljyn. Öljypolttimella tulee saada aikaan tasainen ja tehokkaasti palava liekki. Palamisessa tavoitellaan tehokasta öljyn hajotusta ja hallittua palamisilman tuontia. (Aho ym. 2003, 45-46.)

Käynnistysöljypolttimet voidaan ottaa käyttöön arina- ja leijukerroskattiloiden osaksi aina tarpeen vaatiessa. Kevyen polttoöljyn poltossa painehajoitteinen poltin on käytetyin poltintyyppi. Käynnistysöljypoltin varustetaan öljylanssilla ja paineilmakytkennällä. Paineilma hajottaa öljyn poltettavaksi öljysumuksi. (Aho ym. 2003, 46.)

3 SAVUKAASUPESURIT

3.1 Savukaasujen koostumus

Voimalaitoksissa poltettavien polttoaineiden palamisreaktioissa syntyvät savukaasut sisältävät yleensä hiilimonoksidia (häkää), typpioksideja, hiilidioksidia, vesihöyryä, happea, rikkidioksideja ja pienhiukkasia. Savukaasujen puhdistuksessa huomio kiinnitetään erityisesti rikkidioksidin, typpioksidien ja pienhiukkasten vähentämiseen ja poistoon. Savukaasujen seassa saattaa olla myös muita haitallisia yhdisteitä epäpuhtaan palamisen ja epäpuhtaiden polttoaineiden polton seurauksena. Savukaasujen koostumus riippuu pitkälti voimalaitoskattilasta, polttoaineesta, polttotekniikasta ja palamisolosuhteista. (Huhtinen ym. 2008, 36 & 326.)

Typen oksidien määrään vaikuttavat polttoaineen kosteus, typpipitoisuus sekä palamiskaasujen lämpötilan ja happipitoisuuden suhde kattilan tulipesässä. Alle 30 MW teholuokassa typen oksidien päästöön voidaan vaikuttaa palamisilman vaiheistuksella ja savukaasujen takaisinkiertäyksellä. (Energiateollisuus & YM 2012, 28.)

Rikkidioksidipäästöt määräytyvät polttoaineen rikkipitoisuuden mukaan. Puupolttoaineiden rikkipitoisuus on varsin pieni verrattuna esimerkiksi turpeeseen. Tuhkan sisältämän mineraaliaineksen kalium, natrium ja kalsium sitovat osan rikistä tuhkaan. Savukaasujen rikkipäästöt saadaan poistettua myös mekaanisesti syöttämällä polttokattiloiden tulipesään kalkkia. Kalkki reagoi rikin kanssa muodostaen kipsiä, joka poistetaan tuhkan poiston yhteydessä. (Huhtinen ym. 2008, 36.)

Samoin hiilimonoksidin päästömäärään vaikuttaa polttoaineen laatu, jonka vaihtelut vaikeuttavat polttoaineen tasaista syöttöä kattilaan. Polttoaineen syöttöhäiriöiden ja vähäisen hapen seurauksena häikäpitoisuudet kasvavat. Uusiin teholtaan yli 0,5 MW kattiloihin asennetaan useimmiten happimittaus, jonka avulla säädetään toisioilman (sekundääri-ilma) määrää ja tämän lisäksi uusissa, teholtaan yli 5 MW kattiloissa on käytössä myös hiilimonoksidin pitoisuusmittaus. (Energiateollisuus & YM 2012, 28.)

3.2 Savukaasujen puhdistus

Energiantuotantolaitosten ja teollisuuden kiinteistä polttoaineista peräisin olevat savukaasut veloitetaan puhdistamaan, jotta ilmaan kohdistuvat päästöt saadaan pienennettyä. Päästöraja-arvojen osalta lähtökohtana on parhaan mahdollisen tekniikan (BAT) soveltaminen. Savukaasujen puhdistusmenetelmät ja -laitteistot on oltava tehokkuudeltaan sellaisia, että toiminnanharjoittajan ympäristölupaan määritetyt päästöraja-arvot eivät ylitä. Polttoaineteholtaan yli 5 MW, mutta alle 50 MW energiantuotantoyksiköitä koskeva PIPO-

asetus (asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista 1065/2017) kattaa polttoainekohtaiset päästöraja-arvot, päästöjen leviämiseen liittyvät vaatimukset, sekundääriset päästöt, meluntorjunnan sekä laitoksen toiminnan ja sen päästöjen ja vaikutusten tarkkailun (Rinne 2018, 1-2,18.). PIPO-asetusta sovelletaan ympäristönsuojelun vähimmäisvaatimuksena ympäristönsuojelulain mukaisen luvan vaativaan toimintaan. (Energiateollisuus & YM 2012, 26.) PIPO-asetuksesta kerrotaan lisää luvussa 7.

Päästöjen pienentämisen ohella savukaasujen sisältämää lämpöä pyritään ottamaan pesureiden avulla talteen. Tällä pyritään varmistamaan se, että mahdollisimman pieni osa lämpöenergiasta menisi hukkaan piipun kautta ympäristöön. Savukaasupesurit siis parantavat voimalaitosten energiatehokkuutta ja pienentävät suoria savukaasupäästöjä ilmaan. Suomessa polttolaitoksien yhteyteen rakennetut savukaasupesurit ovat yleensä märkäpesureita, jotka ovat erikoistuneet rikkidioksidien erotukseen savukaasuista. Puhdistimen valintaan vaikuttavat polttoaine, kattilan kokoluokka ja puhdistusasteen vaatimus. Märkäpesuria edeltää usein hiukkaserotin, joka voi olla esimerkiksi sähkösuodatin ja multisykloni. Pesureiden käyttö vaatii lauhdeveden ja tuhkalietteen asianmukaisen käsittelyjärjestelmän. (Energiateollisuus & YM 2012, 22.)

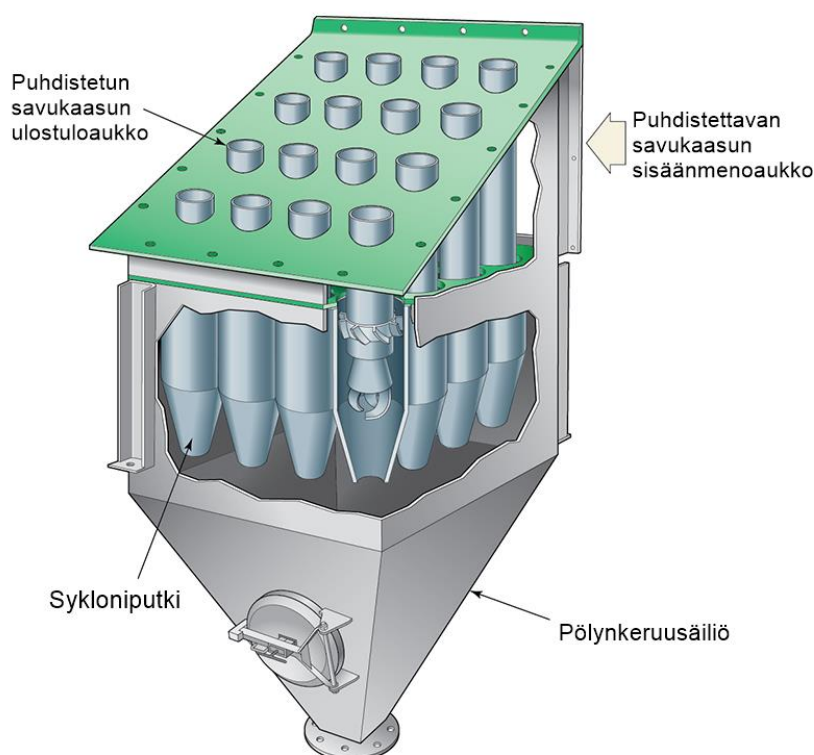
3.3 Hiukkaserottimet

Savukaasujen hiukkaset ovat pääasiassa peräisin palamatta jääneestä polttoaineesta ja polttoaineen sisältämästä tuhkasta. Leijukerros poltosta peräisin oleva hienojakoinen petimateriaali sekoittuu myös herkästi savukaasuihin. Hiukkasten muodostuminen on riippumaton polttotekniikasta, mutta sen sekoittuminen kattilan pohjatuhkaan ja savukaasujen lentotuhkaan riippuu käytetyöstä polttotekniikasta, polttoaineesta ja toimintaolosuhteista. (Aho ym. 2003, 59.)

Tässä työssä perehdytään multisykloneihin ja sähkösuodattimiin hiukkaserottimina. Puun poltosta syntyvästä lentotuhkasta suurin osa on pienhiukkasia, joiden halkaisija on alle 2,5 µm. Sähkösuodattimien keskimääräinen erotusaste kyseisille hiukkasille on vähintään 95 %. Kertymähiukkasille, jotka ovat halkaisijaltaan 0,1-1 µm erotusaste on enää noin 30 %. Syklonien erotusaste pienhiukkasille on sähkösuodatinta heikompi. Sykloni kykenee parhaiten poistamaan pienhiukkaset, jotka ovat yli 5 µm. Puupolttoaineen leijupoltossa sähkösuodatin on varmin erotustapa. Arinapoltossa suuri osa tuhkasta poistuu arinan kautta, joten erottimen tehokkuusvaatimus ei ole arinakattiloissa yhtä suuri kuin leijupetikattiloissa. (Aho ym. 2003, 64-65.)

3.3.1 Multisykloni

Multisykloni perustuu keskipakoisvoiman hyödyntämiseen, ja se saa savukaasun pyöri-
vään liikkeeseen. Multisykloni koostuu useista pienistä sykloneista, joilla on yhteinen pö-
lynkeruusäiliö (kuva 5). Hiukkasia sisältävä savukaasu johdetaan syklonin sisään, jossa
se kulkeutuu pyörivän liikkeen saattamana pohjaa kohti. Hiukkaset sinkoavat syklonin sei-
nämää vasten ja putoavat pölynkeruusäiliöön. Lopulta syklonin keskeltä puhdistunut kaasu
imetään ulostuloaukkojen (kuva 5) kautta pois. (Lehtilä, Ohlström, Raunemaa & Tsupari
2005, 18.)



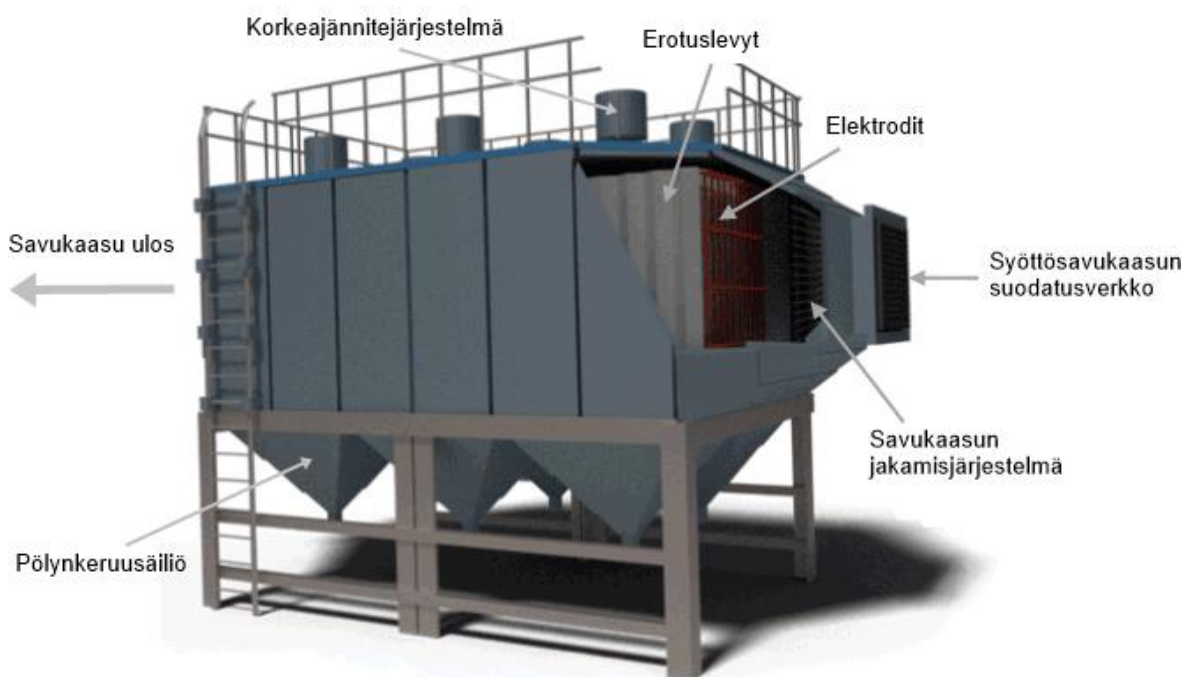
Kuva 5. Multisyklonin rakenne (mukailtu Babcock & Wilcox 2019)

Multisyklonit soveltuvat hyvin hiukkaserottimiksi pienen kokoluokan arinakattiloihin, joiden
savukaasujen hiukkaspitoisuudet ja kosteudet ovat keskimäärin pienempiä kuin leijupeti-
kattiloissa puupolttoainekäytössä. Tavallisesti leijupetikattiloissa poltetaan kosteampaa
polttoainetta ja ilmakertoimet ovat pienempiä kuin pienissä arinakattiloissa. Syklonien ero-
tusaste kasvaa hiukkasten koon ja tiheyden kasvaessa ja pienenee kaasun lämpötilan
noustessa kaasun viskositeetin nousun takia. Pienien hiukkaskokojen suhteen keräysteho
on heikko ja sykloneilla on riski tukkeutua savukaasujen korkeiden hiukkas- ja kosteuspi-
toisuuksien takia. Paineilmasykkeiden avulla tukkeutumisriskiä voidaan pienentää. (Aho
ym. 2003, 64.)

3.3.2 Sähkösuodatin

Sähkösuodatin toimii tehokkaana hiukkaserotintilaitteena kiinteitä polttoaineita käyttävissä voimalaitoksissa. Esimerkiksi puupolttoaineita hyödyntävien leijupetikattiloiden yhteydessä sähkösuodatin on toimiva valinta. Erotustehoon vaikuttaa hiukkasten sähköjohtavuus, mistä syystä päästöt voivat vaihdella polttoaineen ja palamisolosuhteiden mukaan. Investointina sähkösuodatin on kallis, mutta sähkösuodattimilla on pitkä käyttöikä, ne vaativat vain vähäistä huoltoa ja niillä on korkea hiukkastenerotuskyky. (Energiateollisuus & YM 2012, 22.)

Sähkösuodatin koostuu sähkökentistä, joissa hiukkaset varataan sähköisesti ja kerätään erotuslevyille (kuva 6). Savukaasu johdetaan kokoojalevyjen ja jänniteyksikköön yhteydessä olevien elektrodien väliin. Tasavirtajännitteellä elektrodit varataan negatiivisesti, jolloin tapahtuu elektronien irtoaminen ja syntyy sähkövirtaa. Elektronit törmäävät savukaasumolekyyleihin ionisoiden ne ja hiukkaset saavat negatiivisen varauksen. Varatut hiukkaset keräytyvät erotuslevyille ja putoavat pölynkeruusäiliöön (kuva 6). (Aho ym. 2003, 59-61.)



Kuva 6. Sähkösuodattimen rakenne peruspiirteiltään (mukailtu River Glennaps 2019)

3.4 Savukaasupesurin käyttötarkoitus

Savukaasupesurin pääasiallinen käyttötarkoitus on voimalaitosten polttoaineiden palamisesta muodostuvien savukaasujen puhdistaminen ja näin ollen hiukkaspäästöjen

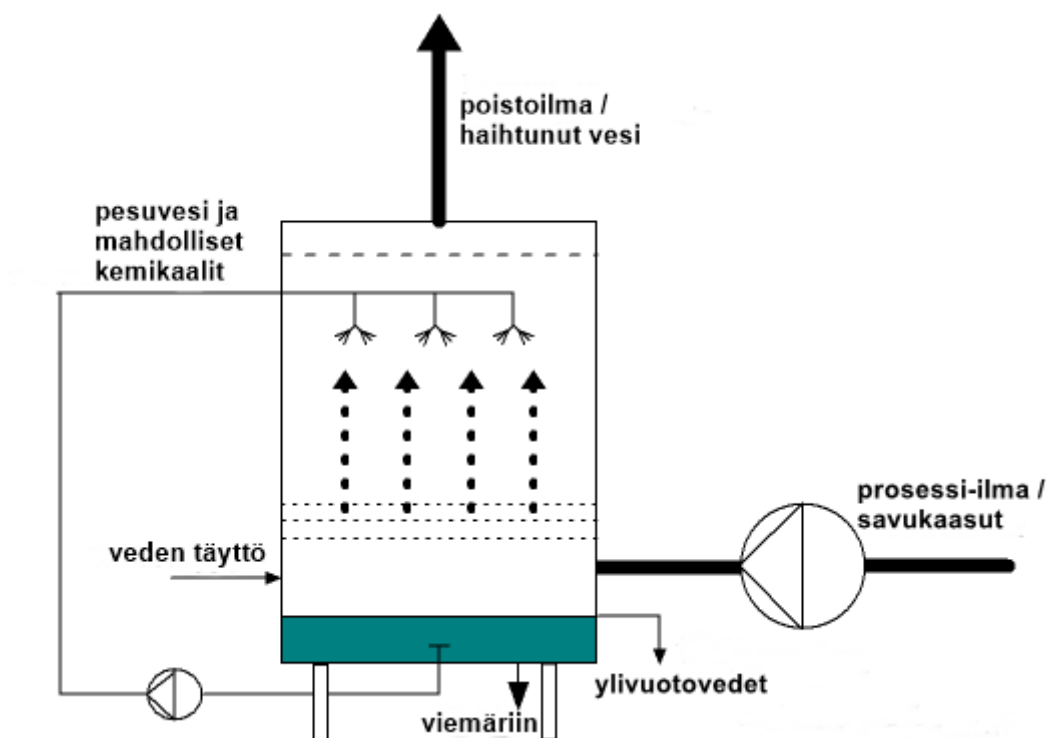
vähentäminen. Enenevissä määrin savukaasupesureiden yhteyteen on kehitetty lämmöntalteenottotekniikkaa, jolla saadaan savukaasujen mukana kulkeutuva hukkalämpö talteen ennen kuin ne johdetaan savupiipusta ympäristöön. Savukaasupesurit mahdollistavat lämmöntuotannon energiatehokkuuden parantamisen voimalaitoksissa, joiden tulee vastata kiristyviin päästöjen hillitsemisvaatimuksiin ja energiatehokkuuden parantamistavoitteisiin.

Suomen voimalaitoksissa käytössä olevat savukaasupesurit ovat yleensä rikin poistoon tarkoitettuja märkäpesureita, joita edeltää jonkinlainen hiukkaserotin ja niihin on liitetty lämmöntalteenottoyksikkö. Materiaaliltaan pesurit ovat haponkestävää terästä tai lujitemuovia. (Energiateollisuus & YM 2012, 22.)

3.5 Savukaasupesurin perustoimintaperiaate

Savukaasujen puhdistusprosessiin sisältyy kaksi päävaihetta. Ensimmäisenä seuraa pesuvaihe, jossa saadaan poistettua pääosa savukaasujen pienhiukkasista. Polttokattilalta tuleva savukaasu johdetaan runsaasti vettä ruiskuttavien ruiskusuutinten muodostaman vesisumun läpi. Pesurilla voidaan hiukkasten lisäksi erottaa myös happamia kemiallisia yhdisteitä, kuten rikkiyhdisteitä, syöttämällä pesuriin veden seassa jotakin alkalista kemikaalia. Savukaasujen hiukkaset takertuvat nestepisaroihin ja jäävät pesurin kiertävään nesteeseen. Savukaasun lämpötila laskee 150-200 °C:sta noin 60-70 °C:een märkälämpötilaan. (Lehtilä ym. 2005, 26.)

Pesuvaihetta seuraa savukaasujen johtaminen lauhduttimeen, jossa savukaasujen sisältämä lämpöenergia siirtyy lauhtumalla vastaan virtaavaan kiertoveteen. Lauhtuminen toteutuu lämmönsiirtopintoina toimivissa täytekerroksissa. Kierrossa oleva lauhdevesi johdetaan lämmönvaihtimelle, josta lauhdeveteen sitoutunut lämpöenergia saadaan otettua talteen esimerkiksi kaukolämpöveden. Ennen savukaasujen johtamista savupiippuun niistä erotetaan pisarat tehokkailla pisan erottimilla. Savukaasu voidaan johtaa ilman lämmitystä niin sanottuun märkäsavupiippuun tai lämmittää jälkikäteen ennen johtamista tavanomaiseen savupiippuun. Osa vedestä haihtuu kuumen prosessiveden takia ja katoaa pakenevien savukaasujen mukana. (Järvenreuna & Nummila 2014.) Tyypillinen ruiskusuutinpesurin kaaviokuva esitettynä alla (kuva 7).



Kuva 7. Savukaasupesurin rakenne yleispiirteiltään (mukailtu Engineering Toolbox 2003)

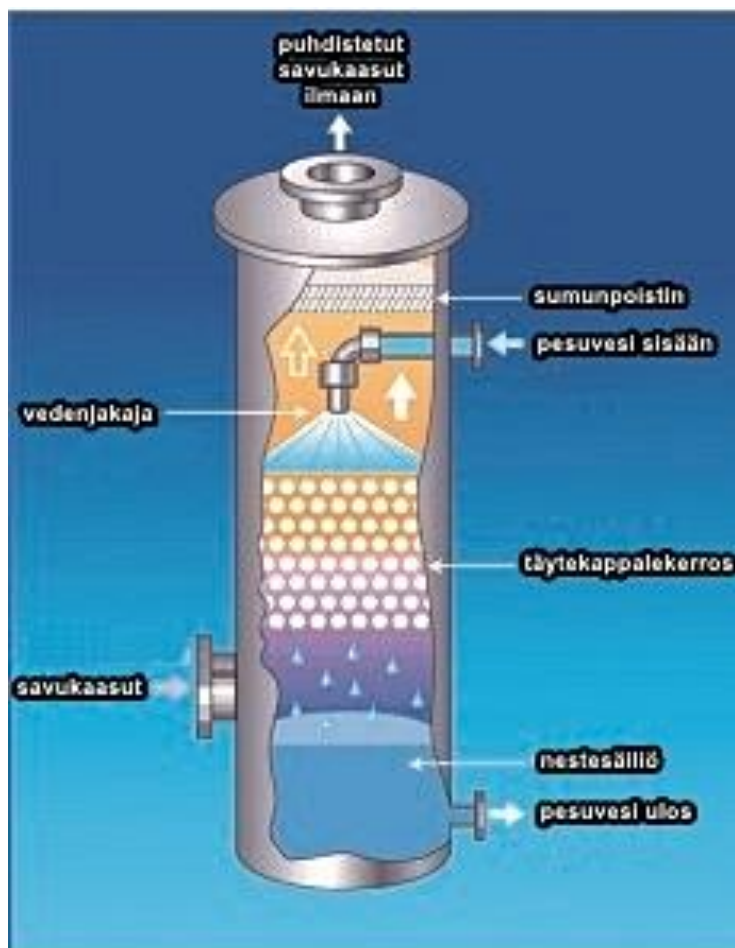
Märkäpesuri vaatii yleensä hiukkasten esierottimen, sillä se ei ole tehokas erottamaan alle $1\text{ }\mu\text{m}$:n pienhiukkasia, eikä ole toimintavarma suuren hiukkaskuormituksen aikana. Isoja ja takertuvia hiukkasia pesuri on tehokas erottamaan. Märkäpesurin erotustehokkuus on tavallisesti 90-95 % kiinteätä polttoainetta hyödyntävissä laitoksissa. Erotustehokkuus pienenee selvästi, kun polttoaineena on öljy. (Aho ym. 2003, 63.)

Osa pesuliuksesta palautetaan takaisin pesukiertoon, mutta savukaasupesureilta joudutaan aika ajoin poistamaan runsaasti epäpuhtaita vesiä viemäriin. Tämä vaatii asianmukaisen jäteveden käsittelyjärjestelmän, sillä hiukkasia sisältävää ylimääräistä liuosta ei yleensä voida hyödyntää mitenkään ja se sisältää ympäristölle haitallisia yhdisteitä. (Aho ym. 2003, 63.)

Täytekappalepesuri

Savukaasupesurissa pyritään aikaan saamaan virtaavan pesuveden ja ilman välille suuri kosketuspinta. Täytekappalepesuri koostuu kolonniksi kutsutusta tornista, joka on täytetty epäsäännöllisen muotoisilla täytekappaleilla. Täytekappaleet luovat huokoisen petimäisen rakenteen, jonka läpi ilma voi virrata, sekä lämmönsiirtopinnan, jonka pinnalle vesi tiivistyy ilman, että vastusmateriaali reagoi savukaasujen yhdisteiden ja hiukkasten kanssa. Täytekappaleet voivat olla materiaaliltaan muovia, keramiikkaa tai metallia. (Lähteenaro 2018, 15-16.)

Tornin yläosassa on vettä täytekappaleiden päälle suihkuttavat suuttimet. Täytekappaleita pitkin virtaava vesi kohtaa alhaalta päin puhallettavan poistoilman. Ilman vesihöyry tiivistyy täytekappaleen pinnalle, jäähtyessään kostean kappaleen pinnan kosketuksesta. Ilmavirtaus puhdistuu, kun ilmavirtauksen seassa kulkevat hiukkaset sitoutuvat veteen. Hiukkaskasliete kasaantuu kolonnin pohjalle. (Lähteenaro 2018, 15-16.) Oheisessa kuvassa on esitetty täytekappalepesurin rakenne (kuva 8).



Kuva 8. Esimerkki täytekappalepesurista ja sen rakenteesta (mukailtu CR Clean Air 2019)

3.6 Hukkalämpö ja lämmöntalteenotto savukaasuista lämpöpumpun avulla

Hukkalämpö on teollisuusprosesseista ylijäävää lämpöenergiaa, joka ilman erillistä lämmöntalteenottoratkaisua menee hyödyntämättömänä hukkaan. Suomessa eniten ylijäämälämpöä syntyy metsäteollisuudessa, kemian- ja metalliteollisuudessa sekä voimalaitoksissa. Lämpöenergiaa on mahdollista saada talteen muun muassa jäte- ja jäähdytysvesistä, poistohöyryistä ja savukaasuista. (Motiva Oy 2019, 5,7.)

Savukaasut sisältävät runsaasti lämpöenergiaa, joka on järkevä ottaa talteen ja hyödyntää tuotantolaitosprosesseissa tai myydä se lähialueen kaukolämpö- tai sähköverkkoon. On

järkevää ja energiatehokasta hyödyntää lämmönlähde suoraan ja mahdollisimman lähellä syntypaikkaansa. Lämmöntalteenotto savukaasuista voidaan toteuttaa mekaanisen lämpöpumpun ja lämmönvaihdinten avulla. Lämmöntalteenoton toteutus vaatii riittävän suuren ja tasaisen lämpövirtauksen sekä sopivan ja pysyvän käyttökohteen. Virtaaman ollessa jatkuvaa ja riittävän suurta saadaan kannattavampi tulos aikaiseksi. (Motiva Oy 2019, 5.)

Savukaasujen sisältämää noin 60-asteista lämpöenergiaa voidaan hyödyntää suoraan kiinteistön lämmityksessä tai lämpö voidaan kerätä talteen lämpöpumpuilla mekaanisesti (Motiva Oy 2019, 17). Lämpöpumpuilla saadaan tuotettua matalista lämpötiloista korkeampia lämpötiloja. Lämpöpumpun pääkomponentit ovat höyrystin, kompressor, lauhtutin ja kuristusventtiili. Toiminta perustuu höyrystymiseen ja lauhtumiseen ja niiden välillä tapahtuvaan lämmönsiirtoon. Lämpöpumpussa kiertää kylmäaine, jonka höyrystin höyrystää. Tämän jälkeen kyllästetyn höyryn muodossa oleva kylmäaine puristetaan kompressorilla korkeampaan paineeseen tulistettuun muotoon. Kylmäainehöyry tiivistyy takaisin nesteeksi lauhtuttimessa, jolloin vapautuu ja siirtyy lämpöä lämmitettävään kohteeseen. Tämän jälkeen nesteen annetaan paisua paisuntaventtiilissä matalampaan paineeseen, jolloin se voidaan taas haihduttaa uudelleen höyrystimessä. (Perttula 2000, 83.)

4 ENERGIAVIRTOJEN SEURAAMINEN JA MITTAUKSEN MAHDOLLISTAMINEN

4.1 Energiavirtojen mittaus virtaavasta aineesta

Virtaavassa aineessa energia on sitoutuneena lämpönä ja liikkeenä. Lämpö voi siirtyä nesteissä ja kaasuissa virtauksen mukana eli konvektiolla. Virtausten avulla voidaan tehokkaasti siirtää lämpöenergiaa. Mikäli konvektio mahdollistetaan pakotetusti pumppuja hyödyntäen, vaatii se ulkoista energiaa, joka on yleensä sähköenergiaa. Yksikään mittari ei kykene mittaamaan suoraan energiamäärää virtaavasta aineesta, oli kyseessä sitten kaasu tai neste. Energiamäärä lasketaan erinäisten mitattavien suureiden pohjalta, joihin lukeutuu esimerkiksi virtausmäärä, paine ja lämpötila. Automaatiojärjestelmä laskee mitattavien suureiden perusteella energiamäärän. Mittauksiin liittyy virhemahdollisuuksia, jotka voivat liittyä itse mittauksiin tai signaalin käsittelyyn, jolloin energiamääristä saadaan vääriä tuloksia. Mitattujen suureiden perusteella energiamäärät voidaan laskea ilman automaatiojärjestelmääkin manuaalisesti, esimerkiksi tietyin väliajoin projektiluontoisesti paikallisesti luettavin kenttämittauksin. (Motiva Oy 2012, 31.)

Jatkuvatoiminen mittaaminen ja seuranta kuuluu osaksi energiatehokkuutta. Energiatehokkuus kertoo käytetyn energian ja tuotannon (tuloksen) suhteen. Mittaamisen avulla voidaan esimerkiksi huomata isot muutokset, joilla on ollut kustannuksia kasvattava vaikutus. Mittaukset, mittauksista jalostettu tieto ja energiatehokkuutta kuvaavat tunnusluvut mahdollistavat energiatehokkuuden hallinnan ja antavat suuntaa mahdollisille energiatehokkuuden parantamistoimenpiteille. Virtojen lämpötiloja, painehäviöitä ja siirtynyttä lämpötehoa seuraamalla saadaan tietoa lämmönsiirron energiatehokkuudesta. Mittauksien avulla saadaan myös suuntaa antava arvio sopivalle puhdistusaikavälille. (Motiva 2016, 3, 6.)

Mitattavien suureiden laatu ja mittauspisteiden määrä ja sijainti tulee arvioida sen mukaan, miten saavutetaan riittävä, mutta järkevä ja taloudellinen lopputulos. Nämä määrittäykset vaativat prosessiselvityksen ja tarvekartoituksen. Teollisuuslaitoksissa on usein valmiina mittauslaitteita, joita voidaan hyödyntää energiatehokkuuden seurannassa ja liittää mahdollisuuksien mukaan olemassa olevaan prosessiautomaatiojärjestelmään. Mikäli todetaan, että olemassa oleva mittalaitteisto ei riitä, on hankittava uutta mittalaitteistoa, jolla energiavirtoja päästään tarkastelemaan. Ennen mittareiden hankintaa on selvitettävä mittausmenetelmän soveltuvuus tietyn suureen mittaamiseen ja se, millä tarkkuudella tulos halutaan saada. Kaikkia suureita ei tarvitse mitata, eikä mittausten tarvitse olla välttämättä kovin tarkkoja. Mittarit ovat kokonaisuudessaan ja yksittäinkin varsin kallis investointi,

joten mittareiden tarve on harkittava tarkasti. Teollisuuden prosesseissa virtaavan aineen energian suuruuteen ja sen vaihteluihin vaikuttaa muun muassa vaihtelut tuotannon määrässä ja laadussa, tuotantoteho ja käyttökatkokset, kiertoprosessin ajotavat sekä ulkolämpötila. Nämä seikat tulee huomioida mittarin valintaprosessissa. (Motiva 2016, 2-5.)

4.2 Mittausten luonne

Tyypillisesti teollisuudessa energiatehokkuuden seurantaan käytettyjä mittauksia ovat lämpötila- ja lämpötilaeromittaukset, massa- ja tilavuusvirtamittaukset sekä paine- ja paine-eromittaukset (Motiva Oy 2012, 20). Tässä työssä esitellään tiivistetysti, minkälaisia mittaustekniikoita yleensä teollisuusprosesseissa on hyödynnetty ja mitä mittareiden valinnassa tulee huomioida.

Virtausmittaus

Virtausmittarin valinnassa tulee huomioida mittausalueen riittävä suuruus ja mittauksen tuottama mahdollinen painehäviö. Virtausmittareille on yleensä määritelty suositeltava virtausnopeus. Lauhdeveden virtauksen määrän mittauksessa on mahdollista hyödyntää laippa-, vortex- tai ultraäänimittauksia tai vaihtoehtoisesti magneettisia virtausmittauksia. Kaikkien virtausmittausten kohdalla on huomioitava, että virtauksen tulee olla mittauskohdassa tasaista (stabiilia) ja jokaisella mittarilla on oma virtaus- ja laajenemiskerroin. (Motiva Oy 2012, 21.)

Kuristuksen avulla saadaan luotettava mittaus putkiston virtauksesta, mutta tämä menetelmä aiheuttaa painehäviötä ja energiankulutus kasvaa. Muut kuin kuristukseen pohjautuvat mittaukset vaativat pitkän ja suoran putkiosuuden, jollaista ei välttämättä ole valmiina tehdasprosesseissa. Mittalaipat ovat paine-eroon perustuvia mittareita, joissa kuristuslaipalla luodaan laipan yli paine-ero, joka mitataan paineen mitta-antureilla. Painelähetin kertoo nesteen tilavuusvirran, joka on muutettavissa massavirraksi ja tehoksi erillisen automaatiojärjestelmän mahdollistamana. Vortex-mittareissa putkeen asetetaan virtauseste aiheuttamaan pyörteitä, joiden esiintymistaajuus on verrannollinen virtausnopeuteen. Virtausnopeus on muokattavissa tilavuusvirtaukseksi, kun putken pinta-ala on tiedossa. Tilavuusvirran ja virtaavan aineen tiheyden tulona saadaan selville massavirta. (Motiva Oy 2012, 21-22.)

Magneettisissa ja ultraäänivirtausmittareissa painehäviöt ovat pieniä ja mittausalueet suuret. Nämä mittarit soveltuvat erityisesti vaihtelevien ja nestemäisten virtausmäärien mittaukseen. Magneettinen tilavuusvirtausmittaus soveltuu sähköä johtavilla aineilla, kuten vedelle. Putken ala- ja yläpinnan väliin muodostetaan magneettikenttä sähkömagneetein. Elektrodit mittaavat jännitteen vedestä ja mitä suurempi jännite on, sitä suurempi on

tilavuusvirtaus. Ultraäänimittarissa putken seinämän läpi johdetaan ultraäänipulsseja virtaavan aineen suuntaisesti toiselle anturipareista ja sieltä virtaa vastaan takaisin toiselle anturille. Nesteen virtausnopeus on verrannollinen ultraäänisignaalin siirtymäaikaan anturilta toiselle. (Motiva Oy 2012, 22.)

Lämpötilamittaus

Teollisuusprosessien lämpötilan mittaamisessa on mahdollista käyttää mekaanisia tai sähköisiä lämpötilamittareita. Lämpötilan mittaukseen on nykyään hyvin paljon erilaisia mittalaitteistovaihtoehtoja, joiden valintaperusteita ovat muun muassa lämpötilan mittausalue, mittaustarkkuus, mitattava aine ja prosessi sekä mittarin sijoituspaikka. On olemassa esimerkiksi vastuslämpötila- ja säteilylämpötila-antureita, termoelementtejä ja lämpötilaindikaattoreita, jotka on suunniteltu erityisesti teollisuuskäyttöön. Sähköisten mittareiden yhteyteen on usein lisätty erillinen näyttö, josta lämpötila on luettavissa paikallisesti sen lisäksi, että tieto menee myös sähköisesti automaatiojärjestelmään.

Säteilylämpötilamittarit määrittävät mitattavan kohteen lämpötilan lämpösäteilyn aallonpituuden perusteella. Säteilylämpötilamittareiden käyttöä teollisuusympäristössä hyödynnetään lähinnä kertaluontoisissa infrapuna- tai lämpökameramittauksissa. Mekaanisia lämpötila-antureita ei kyetä yhdistämään valvomon laitteisiin, sillä niissä ei ole sähköistä signaalin lähetysominaisuutta. Tällainen paikallinen mittaustyyppi soveltuu kohteeseen, jonka lämpötilaa ei tarvitse seurata jatkuvasti. Erilaiset kaapeloidut mitta-anturit soveltuvat erinomaisesti virtaavan veden lämpötilan mittaamiseen putkesta ja lämpötilamittari on yhdistettävissä valvomon automaatiojärjestelmään. (Motiva Oy 2012, 27.)

Lämpötilaa putkesta mitattaessa mittari sijoitetaan yleensä vastavirtaan. Virtaavan aineen tulee olla kovassa liikkeessä mittauskohdassa, jotta tulos on mahdollisimman luotettava. Lämpötilamittari on mahdollista sijoittaa myös pienten putkien mutkakohtiin. Nestemäisen aineen mittauspiste tulee sijoittaa putken alapinnalle luotettavan tuloksen saamiseksi. (Motiva Oy 2012, 28.)

Painemittaus

Painemittaus voi perustua mekaaniseen muodonmuutokseen, nestepaineen muutoksiin tai painevastukseen. Painemittarit voivat olla paikallisesti luettavia tai sähköiseen yhteydenottoon perustuvia. Tällöin painemittariin tulee liittää painelähetin tai paine-erolähetin, joka saa mittaussignaalin muuntumaan sähköiseen muotoon ohjausjärjestelmään ja ajantasainen tieto välittyy valvomoon. Paine-erolähettimet mahdollistavat tarkasteltavan prosessin tilan tai toiminnan seuraamisen. (Motiva Oy 2012, 29-30.)

Paineanturin valinnassa on huomioitava mittausalue, lämpötila ja virtaavan aineen ominaisuudet. Putkiston likaantuminen ja tukkeutuminen aiheuttaa suuren riskin painemittauksen tuloksen luotettavuuteen. Muita riskejä ovat muun muassa paineiskut, virheellinen vertailupainelukema, sähköiset häiriöt ja mekaaninen tärinä. (Motiva Oy 2012, 29.)

4.3 Mittausten laadun seuranta

Tarkkaan harkittu mittarin valinta, mitoitus ja sijoitus osaksi teollisuusprosessia luo perustan mittausten laadulle. Sähköisesti toimivien mittausten laatua ja tuloksia on helppo seurata tuotannonohjauksen automaatiojärjestelmän avulla suoraan valvomon näytöltä, mikäli mittaustulokset on esitetty tiiviisti ja havainnollisesti. Mittaus- ja seurantajärjestelmän avulla voidaan selvittää esimerkiksi prosessien ajotapamuutosten vaikutus prosessin energiatehokkuuteen. (Motiva Oy 2012, 31.)

Prosessia ohjaavan ja seuraavan valvomohenkilökunnan tai operaattoreiden on ilmoitettava kunnossapidolle, mikäli havaitsevat mittauksissa huomattavia virheitä tai mittausten olevan muutoin epäkunnossa. Mittauksiin liittyvä kunnossapito perustuu yleensä korjaaviin toimenpiteisiin. Mittauslaitteiston huollosta ja kalibroinnista tulee huolehtia säännöllisesti. (Motiva Oy 2014, 10-11.)

Putken sisäseinämissä olevat likakerrostumat aiheuttavat lämpövastusta virtaavalle vedelle. Likakerrostumat aiheuttavat siis niin kutsuttua likavastusta. Virtauksen poikkipinta-ala pienenee karheen likakerroksen takia, josta aiheutuu painehäviöitä ja lämmön siirtymisen heikentyä. Painehäviöt aiheuttavat tilanteen, jossa virtausnopeutta tulee pumpuilla kasvattaa ja sähkönkulutus kasvaa. (Motiva Oy 2012, 9). Käytön aikana epäpuhtaudet tulisi pyrkiä suodattamaan mahdollisimman hyvin. Huoltoseisokin aikana putkistoyhteydet voi puhdistaa esimerkiksi korkeapaineisella vedellä tai höyryllä, jossa on mukana hankaa- via tai liuottavia aineita. Myös ultraäänipuhdistus on tehokas putkiston puhdistusmenetelmä. (Motiva Oy 2016, 18-19.)

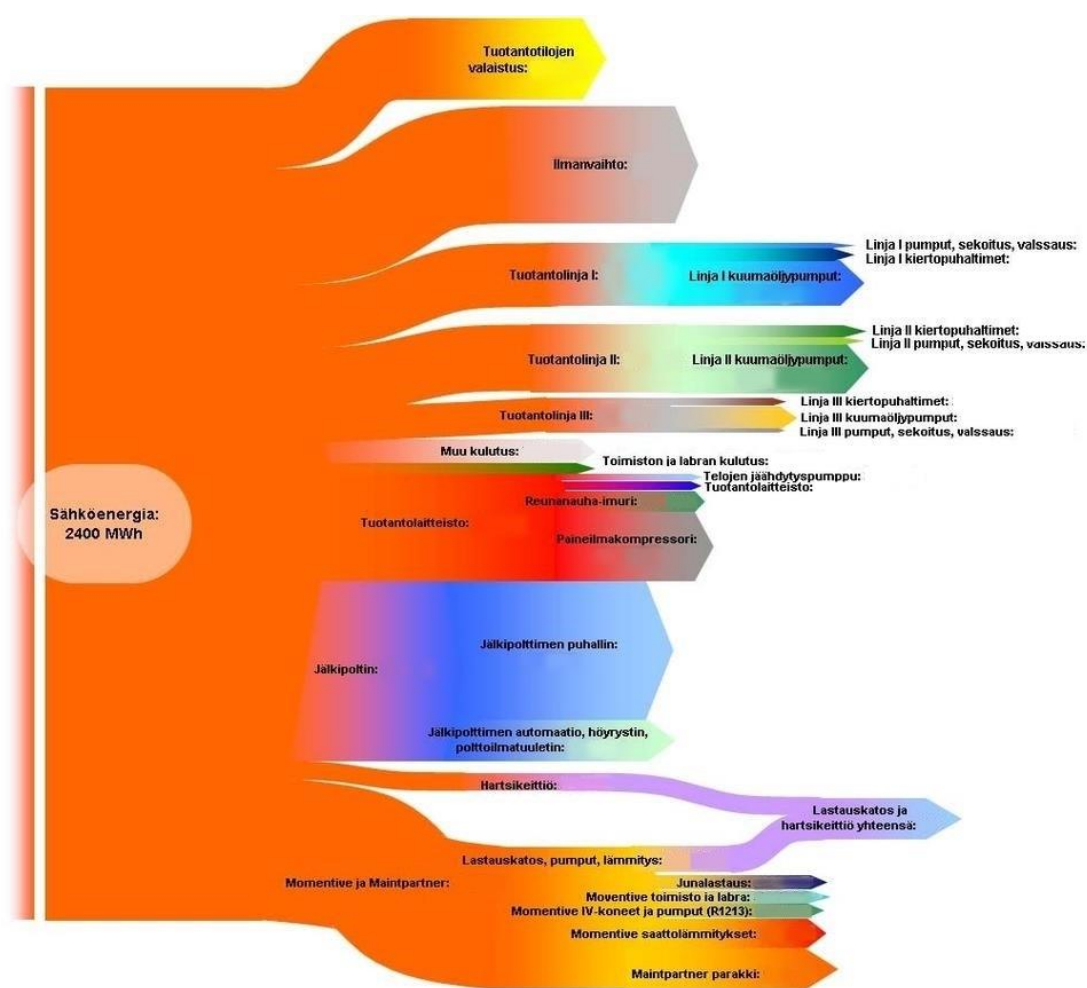
4.4 Energiatase

Tasemuotoinen esitystapa auttaa hahmottamaan tehtaan tietyn prosessin tai prosessin vaiheen kokonaisuuden, mikäli tase on esitetty tarpeeksi yksinkertaisessa visuaalisessa muodossa. Tarkastelun kohteena on valitun tasealueen massa- ja energiavirrat. Energiataseilla selvitetään tulevien ja lähtevien energiavirtojen summa systeemissä ja saadaan tietoa energiatehokkuuden tilasta. (Motiva Oy 2014, 8, 11.)

Energiatase ilmaisee, että energiaa ei joudu systeemissä tai prosessissa hukkaan. Nesteiden mukana kulkeutuvan lämpövirran energiatasetarkastelussa olennainen asia on systeemiin menevän ja sieltä poistuvan nesteen lämpötilan muutos. (Hautala ym. 2014, 173.)

4.5 Sankey-diagrammi

Sankey-diagrammi on virtauksia kuvaava kaaviokuva. Sankey-kaavioissa on suunnatut nuolet, joiden leveys on verrannollinen tarkastelun kohteena olevan virtauksen suuruuteen eli volyymiin. Kaaviossa olevat virtausnuolet voivat kuvata esimerkiksi energia-, materiaali-, aine-, muutto- tai kustannusvirtoja. Sankey-diagrammi havainnollistaa tehokkaasti eri jakeiden keskinäisen suuruuden visuaalisella tavalla (kuva 15). Monimutkaiset prosessit ja järjestelmän rakenteen jakautuminen saadaan esitettyä yksinkertaisemmin korostamalla prosessin osavirtauksia eri värein. Kaavioon merkataan tarkastelussa olevan virtaavan aineen nimi ja numeeriset virtausarvot tarkastelun kannalta järkevimmissä yksiköissä. (Honold 2019.)



Kuva 9. Esimerkki Sankey-diagrammista, jossa tarkasteltavana on sähköenergian kulutuksen jakautuminen (mukailtu FCG 2011)

Sankey-diagrammeja hyödynnetään muun muassa energianhallinnassa, kiinteistöhallinnassa, prosessisuunnittelussa ja -ohjauksessa sekä monissa muissa numeeristen tietojen visualisointia vaativissa yhteyksissä. Sankey-diagrammit ovat hyödyllisiä osana yleisöesityksen esittelymateriaalia. Sankey-diagrammin laadinnassa ei tarvitse noudattaa mitään tiettyä standardia ulkoasun tai rakenteen suhteen. Suunnittelu- ja asetteluvaihtoehtoja on lukuisia ja omia näkemyksiä voi vapaasti hyödyntää. Täytyy kuitenkin huomioida, että kaaviossa ei luoda liian sekavaa ja vaikeasti ymmärrettävää. Sankey-kaavio on työkalu, josta on hyötyä erisuuruisten virtauksien tarkastelussa, jolloin nuolien leveysero erottuu paremmin. (Ifu Hamburg 2019.)

5 PI-KAAVIO

5.1 PI-kaavioiden merkitys

PI-kaavioiden, eli putkisto- ja instrumentointikaavioiden, tarkoitus on esittää jonkin prosessin teknisten komponenttien sijainti toisiinsa nähden. Komponentteja ovat muun muassa prosessilaitteet, putket, haaroitukset, venttiilit ja pumpput. PI-kaavioon yhdistetään myös prosessilaitteiston kuvaus ja tekniset tiedot. Instrumentoinnilla tarkoitetaan mittaus- ja säätölaitteiston kokonaisuutta osana prosessia ja putkireittejä. Instrumenttien avulla prosessia voidaan tarkkailla ja ohjata joko manuaalisesti tai automaattisesti ja toteuttaa tiedonkeruuta. (PSK 3602, 2008.)

PI-kaavio on käytännön työkalu ennen kaikkea prosessin käyttöhenkilöstölle, mutta myös suunnittelu-, asennus- ja kunnossapitohenkilöstö pystyy perehtymään niiden avulla prosessiin. Kunnossapitohenkilöstö ja valvovat viranomaiset näkevät kaaviosta prosessikokonaisisuuden oleelliset asiat ja voivat hyödyntää sitä jatkokehityssuunnitelmissa ja esimerkiksi kustannusarvioiden teossa. (PSK 3603, 2012.) PI-kaaviot laaditaan pääasiassa tietokoneella piirto-ohjelmilla sähköiseen asiakirjamuotoon. Sähköisiä PI-kaavioita voidaan muokata jälkikäteen, jos laitteistoihin halutaan tehdä ajan mittaan muutoksia.

5.2 PI-kaavioiden tietosisältö

PI-kaavio sisältää kaaviomuodossa yksityiskohtaisen tietosisällön tietyistä rajatusta prosessista. PI-kaavioiden liittyviä ohjeistavia standardeja on olemassa useita. Vähimmäisvaatimukset PI-kaavioiden tietosisällöstä esitetään standardissa PSK 3602, standardi PSK 3605 määrittelee PI-kaavioiden ja virtauskaavioiden symbolit prosessiteollisuudelle ja standardissa PSK 3603 selvitetään esitystapa ja merkitsemisohjeet PI-kaavion laatimista varten. Tässä työssä on perehdytty nimenomaan näihin kolmeen standardiin, joiden avulla on mahdollista luoda asianmukainen PI-kaavio.

PI-kaaviossa esitetään prosessin päälaitteet, putkistot ja kuljetustiet, tyhjennys-, ilmastus- ja puhdistusyhteet, venttiilit ja instrumentointi. Putkilinjoihin merkataan putkilinjatunnukset ja venttiilien yhteyteen venttiilitunnukset. Prosessiolosuhteet ja virtausmäärät eivät yleisesti ottaen kuulu esitettäviin asioihin. Isot päälaitteet, kuten polttokattilat, säiliöt ja savukaasupesurit, tulee piirtää mahdollisimman oikean muotoisina ja niiden nimi ja kapasiteetti tulee olla näkyvissä. Instrumentointi toteutetaan yleisillä piirrosmerkeillä niin tarkasti kuin se on kaavion lukemisen ja ymmärtämisen kannalta välttämätöntä. Putkiston ja laitteiden mittauspisteet ja mittarit esitetään niiden todellisen sijainnin mukaisesti. Yrityksillä on

vapaus soveltaa merkintätapoja ja piirrosmerkkejä omiin prosesseihin parhaiten sopivalla tavalla. (PSK 3603, 2012.)

5.3 PI-kaavion laadinta

PI-kaavio voidaan laatia standardien ohjeiden pohjalta ja itse piirtäminen tapahtuu tietokoneelle asennetulla piirto-ohjelmalla, joita ovat esimerkiksi CADS- ja AutoCAD-piirto-ohjelmistot. Piirto-ohjelmiin on ladattavissa lisäohjelmistoja, jotka on tarkoitettu erityisesti putkisto- ja instrumentointikaavioiden laatimiseen. PI-kaavioiden piirtäminen vaatii perinpohjaista suunnittelua ja itse prosessiin tutustumista.

Piirtämisen peruseriaatteiden mukaan ensimmäisenä tulee piirtää prosessin päälaitteet tarpeeksi väljästi toisiinsa nähden. Tämän jälkeen piirretään laitteiden väliset putkilinjat tunnuksineen. Putkilinjat suositellaan piirrettäväksi mahdollisimman lyhyiksi ja turhia mutkia tulee välttää. Putkilinjatunnus koostuu linjanumerosta, virtaavan aineen tunnuksesta, putken nimelliskoosta ja putkiluokasta. Laite-, putkilinja- ja varustetunnusten merkintätavat vaihtelevat yrityskohtaisesti. Standardissa PSK 3603 on esitetty ohjeita, kuinka putkilinjatunnusten muodostaminen voidaan esimerkiksi toteuttaa. Prosessivirtojen virtaus-suunnat merkataan nuolilla putkien liittymiin ja putkien yhdistyessä laitteeseen. Prosessiin tulevien virtausten tulo-osoite sijoitetaan kaavion vasempaan reunaan ja prosessista lähtevien virtausten lähtöosoite kaavion oikeaan reunaan. Putkilinjojen komponentit, kuten pumput ja venttiilit lisätään, kun putkilinjat on sijoitettu kaavioon. Putkiston tyhjennysyhteet merkataan osoittamaan alaspäin ja ilmastukset ylöspäin. (PSK 3603, 2012.)

6 TOTEUTUSMENETELMÄT

6.1 Tiedonhankintamenetelmät

Opinnäytetyöprosessin alussa tutustuttiin painetun kirjallisuuden ja sähköisten verkkojulkaisujen kautta voimalaitostekniikkaan, erityisesti vastapainevoimalaitoksen toimintaan, polttokattiloihin ja -tekniikoihin sekä savukaasupesureihin ja hiukkaserottimiin. Verkkojulkaisuista haettiin tietoa energian mittauksen mahdollistamisesta sekä muista mittaukseen liittyvistä asioista. Tutkittavana kohteena olevaan vesikiertoprosessiin ja voimalaitokseen laitteineen perehdyttiin sähköisen lähdemateriaalin ja olemassa olevien PI-kaavioiden avulla, jotka haettiin toimeksiantajan tietojärjestelmästä omatoimisesti. Jonkun verran tietoa voimalaitokseen, tehtaaseen ja tarkasteltavaan prosessiin liittyen löydettiin myös julkisista verkkojulkaisuista. Toimeksiantajalta saatiin alkuohjeistusta sähköpostitse ja paikan päällä tehtaalla, kuinka työn tekeminen kannattaa aloittaa ja mitä tuloksia tulisi saada aikaiseksi.

Vaneritehtaan ja voimalaitoksen tiloissa suoritettiin satunnaisia kierroksia kävellen sekä ohjatusti että itsenäisesti. Näiden kierrosten aikana kartoitettiin savukaasupesureiden ja hautomoalaiden väliset pääasialliset putkiyhteydet, venttiilit ja kierrätysvesipumput. Samalla otettiin paljon kuvia, jotta putkireittien ja komponenttien tarkastelu onnistuu jälkeenpäin myös etänä. Kierrosten yhteydessä putkien pinnasta ja virtaavasta kiertovedestä mitattiin lämpötiloja infrapunälämpömittarin avulla ja mitattiin putkikoot siltä osin kuin se oli mahdollista. Voimalaitoksen henkilöstölle oli mahdollista esittää kysymyksiä.

6.2 Työssä käytetyt laskukaavat ja mittaukset

Työn sisältöön kuuluvat virtaavaan veteen ja lämpöenergiaan liittyvät laskutoimitukset. Laskutoimituksissa keskeisessä asemassa ovat tilavuusvirta, massavirta ja virtaavan veden sisältämä lämpöenergia. Laskukaavoja on hyödynnetty erilliseen Excel-taulukkoon koostetuissa mittaustiedoissa. Työssä käytetyt laskukaavat ovat löydettävissä sähköisestä taulukkokirjasta (Taulukot.com 2020).

Tilavuusvirta

Tilavuusvirta on putken poikkileikkauskohdan läpi aikayksikössä virrannut tilavuusyksikössä ilmoitettu nestemäärä (1). Yleensä tilavuudet on esitetty kuutiometreinä (m³) ja aikayksikkönä on sekunti (s) tai tunti (h).

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

jossa $q_v = \text{tilavuusvirta [m}^3/\text{s, m}^3/\text{h]}$

$\Delta V = \text{nestemäärä tilavuusyksikössä [m}^3]$

$\Delta t = \text{aikayksikkö [h, s]}$

Nesteen kokoon puristumattomuuden takia, nestettä virtaa putkessa saman verran tietyssä aikayksikössä putken joka kohdassa. Täten saadaan edeltävästä yhtälöstä (1) muodostettua seuraava yhtälö (2):

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{A \Delta s}{\Delta t} = A v \quad (2)$$

jossa $q_v = \text{tilavuusvirta [m}^3/\text{s, m}^3/\text{h]}$

$\Delta V = \text{nestemäärä tilavuusyksikössä [m}^3]$

$\Delta t = \text{aikayksikkö [h, s]}$

$\Delta s = \text{tarkasteltava etäisyys putkessa kahden pisteen välillä [m]}$

$A = \text{putken poikkipinta-ala [m}^2]$

$v = \text{nesteen keskimääräinen virtausnopeus [m/s]}$

Tasapaksun putken tapauksessa poikkipinta-ala ja virtausnopeus eivät muutu. Putkessa tilavuusvirralle pätee jatkavuusyhtälö (3):

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3)$$

jossa $A_1 = \text{putken poikkipinta-ala tarkasteltavassa kohdassa 1 [m}^2]$

$v_1 = \text{nesteen virtausnopeus tarkasteltavassa kohdassa 1 [m/s]}$

$A_2 = \text{putken poikkipinta-ala tarkasteltavassa kohdassa 2 [m}^2]$

$v_2 = \text{nesteen virtausnopeus tarkasteltavassa kohdassa 2 [m/s]}$

Putken poikkipinta-ala saadaan selville putken säteen avulla kaavalla (4):

$$A = \pi r^2 \quad (4)$$

jossa $A = \text{putken poikkipinta-ala [m}^2]$

$r = \text{putken säde [m]}$

Massavirta

Massavirta saadaan selville tilavuusvirran avulla, kertomalla se nesteen tiheydellä seuraavan kaavan (5) mukaisesti:

$$q_m = \rho q_v \quad (5)$$

jossa q_m = massavirtaus [kg/s, kg/h]

ρ = nesteen tiheys [kg/m³]

q_v = tilavuusvirtaus [m³/s, m³/h]

Tiheys vastaa massan suhdetta tilavuusyksikköä kohti, joten nesteen massa on tällöin nestemäisen aineen tiheyden ja nestetilavuuden tulo (6):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \Leftrightarrow \quad m = \rho V \quad (6)$$

jossa m = nesteen massa [kg]

ρ = nesteen tiheys [kg/m³]

V = nestemäärän tilavuus [m³]

Lämpömäärä

Lämpö on lämpötilaeron vuoksi aineesta tai paikasta toiseen siirtyvää energiaa. Lämpömäärä kuvaa tarkasteltavaan aineeseen siirtyvän (sitoutuvan) tai siitä poistuvan (vapautuvan) lämpöenergian määrää. Aineen lämpöenergiamäärä saadaan selville seuraavan kaavan (7) mukaisesti:

$$Q = cm\Delta t \quad (7)$$

jossa Q = lämpömäärä [J]

c = tarkasteltavan aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]

m = kappaleen tai aineen massa [kg]

Δt = lämpötilan muutos [°C]

Lämpövirta

Virtauksen mukana tietyssä ajassa siirtyvää lämpömäärää eli lämmön virtausnopeutta kuvataan suureella lämpövirta. Lämpövirta vastaa lämpötehoa ja sen yksikkö onkin sama kuin tehon yksikkö (J/s tai W). Lämpövirta saadaan selville seuraavan yhtälön (8) mukaisesti:

$$\phi = \frac{Q}{t} = \frac{mc\Delta t}{t} = c\Delta t \frac{m}{t} = c\Delta t q_m \quad (8)$$

jossa ϕ = lämpövirta [J/s, W]

Q = lämpömäärä [J]

t = aikayksikkö [h, s]

m = kappaleen tai aineen massa [kg]

c = virtaavan aineen ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg°C]

Δt = virtaavan aineen lämpötilan muutos [°C]

q_m = virtaavan aineen massavirta [kg/h, kg/s]

6.3 PI-kaavion ja Sankey-diagrammin laadinta

Osana opinnäytetyötä tuli toimeksiantajan toiveen mukaan luoda tietosisällöltään tarkempi PI-kaavio savukaasupesureiden ja hautomoalaiden välisestä vesiohjauksesta ja putkistoreiteistä. PI-kaavio päätettiin luoda AutoCAD Plant 3D (Student License) -piirto-ohjelmistoa ja siihen sisältyvää P&ID-suunnittelutyökalua käyttäen. Yleisesti PI-kaavioihin, niiden sisältöön ja piirtämiseen perehdyttiin ohjeistavien standardien, toimeksiantajan omien olemassa olevien PI-kaaviotiedostojen sekä prosessitekniikan koulutusohjelmaan sisältyvän PI-kaavioita käsittelevän verkkokurssin avulla. PI-kaavion piirtäminen tuli opetella itsenäisesti ilman aikaisempaa kokemusta prosessikaavioiden piirtämisestä.

Sankey-diagrammeihin tutustuttiin englanninkielisten verkkosivujen ja esimerkkikaaviokuvien pohjalta. Sankey-diagrammissa esitettävät lämpöenergiavirtojen suuruudet tuli ensin laskea lämpötila-arvojen ja tilavuusvirtojen avulla edellä esiteltyjä laskukaavoja käyttämällä ja koota Exceliin, minkä jälkeen itse kaaviokuva toteutettiin verkosta löytyvää ilmaista SankeyMATIC-työkalua hyödyntämällä.

7 TARKASTELUSSA OLEVA VOIMALAITOS JA SAVUKAASUPESURIT

7.1 Energiantuotanto

Voimalaitos X on sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitos eli vastapainevoimalaitos. Voimalaitos sijaitsee sähkön ja lämmön kulutuskohteiden ja puunjalostusteollisuuden välittömässä läheisyydessä. Voimalaitoksen pääasiallinen tehtävä on mahdollistaa katkeamaton höyryntuotanto vaneritehtaan tarpeisiin. Voimalaitoksella on käytössä kolme polttokattilaa: arina- ja kiertopetikatilla sekä vähemmälle käytölle jäänyt öljykattila. (Voimalaitos X 2016.)

Energia veden lämmittämiseen, höyryttämiseen ja tulistamiseen tuotetaan polttamalla vaneritehtaan tuotannosta peräisin olevaa puupohjaista polttoainetta, johon lukeutuvat muun muassa puunkuori, hake ja puru. Puupolttoaineiden käyttö on kasvanut viime vuosina ja kevytpolttoöljyn käyttö vähentynyt huomattavasti. (Voimalaitos X 2016.) Yritys X ja Voimalaitos X kuuluvat energiatehokkuussopimuksien piiriin. Energiatehokkuutta parantavia toimenpiteitä on tehty viimeisen kymmenen vuoden aikana useita ja tälläkin hetkellä on käynnissä energiatehokkuuteen myönteisesti vaikuttava laaja projekti.

7.2 Savukaasupesurit

Savukaasujen puhdistusta tehostamassa ja energiatehokkuutta parantamassa arinakattilan yhteydessä on sähkösuodatin ja savukaasupesuri ja kiertopetikatilan yhteydessä multisykloni ja savukaasupesuri. Molemmat savukaasupesurit ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia ja ne on suunniteltu biopolttoaineita hyödyntäviin polttolaitoksiin. Savukaasut johdetaan kattilasta pesuriin, jossa voimakas vesisuihku vähentää savukaasuista kiinteitä hiukkasia ja rikkidioksidgeja. Savukaasupesurissa on pesuveden esiselkeytin, joka varmistaa kiertoveden matalan kiintoainepitoisuuden. Tällöin vettä ruiskuttavien suutinten tukkeutuminen ja osien kuluminen jää vähäiseksi. Selkeyttimeen jäävä kiintoaineseos sekoittuu lietteeksi pesurin pohjalle, ja se jatkokäsitellään. (Ehox Tuote Oy 2019.)

Pesukierrossa hyödynnetään savukaasujen lauhdutusprosessin vettä, eikä vesijohtovettä tarvitse erikseen lisätä. Savukaasuista pesuveteen talteen otettu lämpöenergia hyödynnetään vaneritehtaan tukkien hautomoaltaiden lämmityksessä. Savukaasupesurin alaosaasta lämmin pesuvesi johdetaan hautomoaltaalle ja sieltä edelleen takaisin savukaasupesurille uudelleen hyödynnettäväksi savukaasujen puhdistuksessa. Hautomoaltaiden vesi johdetaan savukaasupesurin yläosaan nesteenjakojärjestelmään, jossa vesi hajoaa pisaroiksi ja jakautuu pesurin poikkipinnalle. (Ehox Tuote Oy 2019.) Savukaasujen lämpötilaa mitataan ennen hiukkaserotinta ja savupiipusta ennen kuin savukaasut johdetaan 30 metriä

korkean savupiipun kautta ilmaan. Savukaasujen lämpötila on piipussa noin 60 °C. (Voimalaitos X 2016.)

7.3 Savukaasupesureiden lauhdevesien laatu ja käsittely

Savukaasupesureiden lauhdevedet sisältävät aina jonkin verran kiintoainetta, joka on peräisin kattiloissa poltettavien biopolttoaineiden lentotuhkasta. Kiintoainepitoisuus on riippuvainen polttoaineen laadusta, mutta yleisesti raskasmetallipitoisuudet ovat pieniä. Kiintoaineen määrä vaihtelee kattiloiden ajotavan mukaan, ja lauhdeveden määrä vaihtelee sen mukaan, kuinka paljon sitä tarvitaan pesureiden toiminnan täytäntöön. Savukaasupesureille johdetaan järvivettä palovesiputkiston kautta tilanteessa, jossa savukaasuista ei lauhdu tarpeeksi vettä savukaasupesureiden lauhdutustehon ylläpitämiseksi. Ilman riittävää vesimäärää kiertoprosessiin syntyy tukkeumia. (Voimalaitos X 2020a.)

Tehdasseisokkien aikana, kun energiantarve pienenee huomattavasti tai lakkaa kokonaan, polttokattilat ajetaan alas ja näin myös savukaasupesurit putkistoihin tyhjenetään. Kattiloiden alasajotilanteessa pesureiden lauhdevedet joudutaan johtamaan suoraan viemäriin pelkän kiintoaine-erottimen läpi. Normaalitylanteessa pesureiden lauhdevedet ohjataan jätevedenkäsittelyjärjestelmään, mutta pesureiden tyhjennysvesien ohjaus tapahtuu eri kohdasta, eikä jätevedenkäsittelyyn ohjaaminen onnistu teknisesti. (Voimalaitos X 2020a.)

7.4 Kierrätysvesipumput

Veden kierto savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välillä mahdollistetaan dynaamisten pumppujen ryhmään kuuluvilla keskipakopumpuilla. Pumpun läpi käy jatkuva virtaus. Juoksupyörä antaa nesteelle nopeuden ja keskipakovoiman ansiosta paineenlisäyksen. Tällöin neste pääsee kulkeutumaan paineputkeen virtausvastusten, korkeuseron ja vastapaineen läpäisten. (Huhtinen ym. 2008, 136-137.) Molemmilla savukaasupesureilla on oma poistopumppu ja kierrätyspumppu mahdollistamassa lauhdeveden kierrättämisen

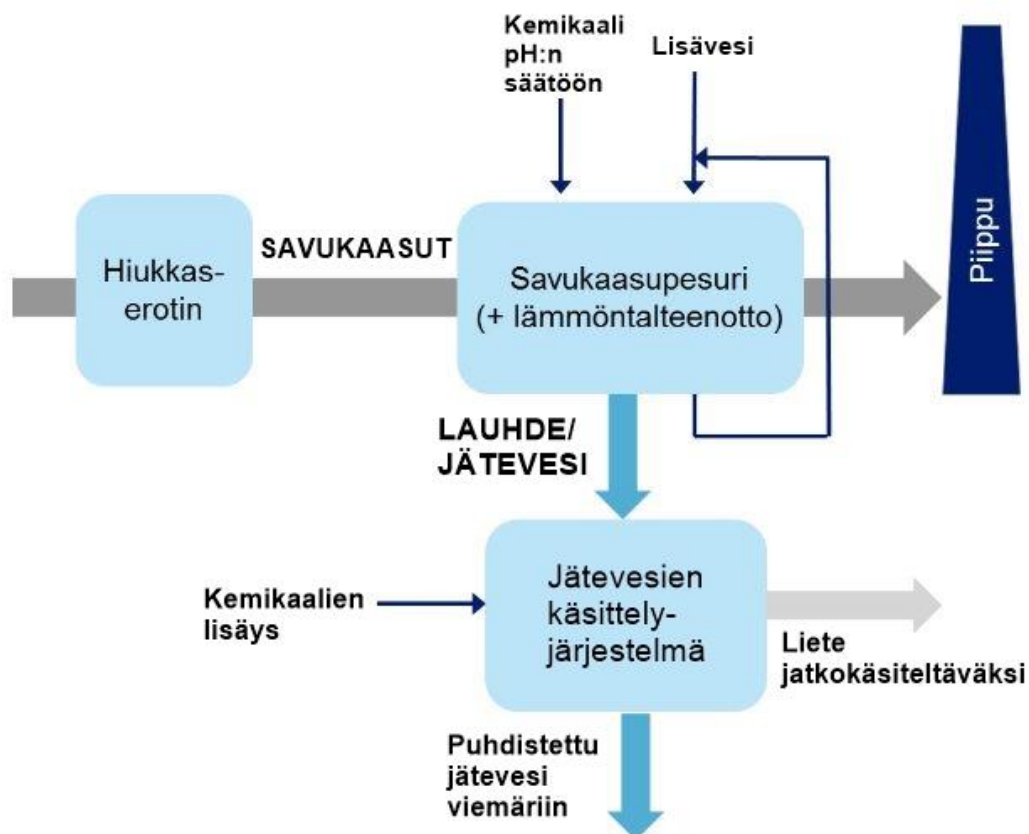
Pumppujen tärkeimmät suureet ovat tilavuusvirta Q (m^3/s), nostokorkeus H (m), tehon tarve P (W) ja hyötysuhde η . Tilavuusvirta määrittelee nestetilavuuden, jonka pumppu siirtää tietyssä aikayksikössä paikasta toiseen. Nostokorkeus kertoo pumpun nesteelle aiheuttamasta korkeusaseman lisäyksestä, joka merkitsee yleensä paineen lisäystä. Nesteen painetta on nostettava, jotta neste saadaan siirtymään haluttuun paikkaan.

7.5 Voimalaitoksen päästöt ja PIPO-asetus

Voimalaitoksen toiminnasta aiheutuu rikkidioksidi- (SO_2), typpioksidi- (NO_x), hiilidioksidi- (CO_2) ja hiukkaspäästöjä. Kiertopetikattilan ja arinakattilan savukaasujen hiukkas- ja typenoksidipäästöt mitataan tietyin lakisääteisin väliajoin. Öljykattilan typenoksidipäästöjä mitataan myös, mutta harvemmin puupolttoainekattiloihin verrattuna, sillä sen käyttö-tuntimäärät ovat nykyään varsin pienet. (Voimalaitos X 2016.)

Voimalaitoksen on noudatettava vuoden 2018 alusta lähtien valtakunnallisesti voimaan tullutta PIPO-asetusta (valtioneuvoston asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista 1065/2017). PIPO-asetus määrittää muun muassa voimalaitoksen päästöraja-arvot, aikavälin savukaasupäästöjen määräaikaismittauksien toteuttamiselle ja mistä toimintaa koskevista asioista on pidettävä kirjanpitoa. PIPO-asetus velvoittaa toiminnanharjoittajaa raportoimaan vuosittain paikalliselle ympäristöviranomaiselle tietyt toimintaa koskevat tiedot. Raportoitaviin tietoihin kuuluu kattiloiden käyttötuntien ja tuotetun energian määrä, polttoaineiden ja kemikaalien määrä ja laatu, melumittausten tulokset, päästömittausraportti, jätevesien määrä ja laatu sekä tuhkan ja jätteiden määrät ja toimituspaikat. (Rinne 2018, 2, 18.)

Työn tekemisen aikana ilmeni, että voimalaitoksen savukaasupesureiden lauhdevesien käsittelyjärjestelmä tullaan uusimaan ja se muuttuu nykyisestä. Savukaasupesureiden lämmintä lauhdevettä ei enää tulla johtamaan suoraan hautomoaltaisiin ja järjestelmä muutetaan PIPO-asetuksen mukaiseksi. PIPO-asetuksessa on esitetty vaatimukset, kuinka savukaasujen käsittelyssä syntyvien lauhde/jätevesien käsittely ja tarkkailu tulisi toteuttaa. Savukaasupesureilta johdettavat jätevedet on neutraloitava, selkeytettävä ja suodatettava kiintoaineista ja ympäristölle haitallisista aineista ennen viemäriin tai vesistöön johtamista. Jäteveden määrää, lämpötilaa ja happamuutta (pH) tulee tarkkailla jatkuvatoimisesti. Paikallinen ympäristölupaviranomainen ei enää miellä savukaasupesureiden lauhdevesien johtamista hautomoaltaisiin laadullisesti tarpeeksi riittävänä savukaasupesureiden jätevesien käsittelymenetelmänä. (Voimalaitos X 2020b.) Savukaasupesureilta johdettavan lauhdeveden määrän ja laadun tarkastelu on tällä hetkellä hankalaa hautomoaltaiden veteen sekoitettuna. Savukaasupesureiden lauhdevesien kiintoainepitoisuudet tulee saada entistä pienemmiksi viemäriin johdettaessa. Oheisessa kuvassa (kuva 10) on esitetty PIPO-asetuksen mukainen savukaasupesureiden jätevesien käsittelymenetelmä, johon tarkastelussa oleva voimalaitoskin on lähitulevaisuudessa siirtymässä.



Kuva 10. PIPO-asetuksen mukainen savukaasupesureiden jätevesien käsittelymenetelmä (mukailtu Pöyry 2018)

8 SAVUKAASUPESUREIDEN JA HAUTOMOALTAIDEN VÄLINEN VESIKIERTO

8.1 Hautomoaltaiden merkitys

Vaneritehtaalle tuotantoon tulevat tukit nostetaan hautomoaltaisiin (kuva 11), joissa tukkeja haudutetaan vähintään vuorokausi, jolloin kuori irtoaa helpommin ja puuaines on tarpeeksi pehmeää, mikä edesauttaa sorvauksen onnistumista paremmin. Vaneritehtaalla on kolme betonista valettua hautomoallasta, jotka sijaitsevat osittain katetuissa hautomoallasrakennuksissa. Hautomoaltaisiin pumpataan kaivosta järvivettä täyttövedeksi.



Kuva 11. Hautomoaltaan pääty, josta tukit nostetaan tuotantoprosessiin

Tehtaan hautomoaltaiden vesien lämmittäminen toteutetaan pääasiassa viilunkuivaajien poistoilmasta lämmöntalteenottoroneilla kerätyllä lämpöenergialla. Tämä lämmitystapa on energiatehokkuuden näkökulmasta kannattavaa vaneriteollisuudessa (Metsäliittokonserni 2008, 40). Hautomoaltailta suodatettua vettä pumpataan uudelleen kiertoon lämmöntalteenottotornien kautta viilunkuivaajille. Vesikierto on toteutettu niin, että kierrosta poistuu mahdollisimman vähän lämmintä vettä. Hautomoaltaiden lämmityksessä hyödynnetään lämmöntarpeen mukaan myös voimalaitoksen savukaasupesurien lauhdevettä. Vesi kiertää suljetussa kierrossa pesureiden ja hautomoaltaiden välillä. Hautomoaltaissa veden lämpötila pyritään pitämään noin 50 °C:n tasolla. Hälytys käynnistyy altaiden lämpötilan laskiessa alle 35 °C:n. (Voimalaitos X 2016.)

Hautomoaltaisiin kertyy kuorilietettä ja muita kiintoaineita (kuva 12), jotka tulee aika ajoin ruopata ja erottaa vedestä, kuivata ja käsitellä asianmukaisesti. Hautomoaltaiden liete kuivatetaan kuivauskentällä ja kuivattu liete poltetaan voimalaitoksen puukattilassa muun puuperäisen polttoaineen seassa. Hautomoaltaat tyhjennetään vuosittain vaneritehtaan kesäseisokin aikana. Hautomoaltaiden tyhjennyksen yhteydessä vedet johdetaan kemiallisen saostuksen, selkeytyksen ja suodatuksen kautta vesistöön. (Voimalaitos X 2016.)



Kuva 12. Lietettä ja kuona-ainesta hautomoaltaassa

8.2 Hautomoaltaiden vesien nykyinen ohjaus

Hautomoaltaat ovat putkistoyhteydessä toisiinsa, jolloin vettä voidaan ajaa kahden pumpun ja väliventtiilien avulla altaasta toiseen tarpeen mukaan. Tällaisia tarpeita voivat olla esimerkiksi hautomoaltaiden pinnan korkeuden pitäminen halutulla tasolla, altaiden toimivuuden parantaminen ja hautomovesien kulkeutumisen estäminen ylivuotona järveen. Altaiden pumppujen kapasiteetti on noin 150 m³/h.

Altaiden vesien ohjaus onnistuu sähköisesti hautomoaltaan tukkinostimen kopissa sijaitsevasta ohjausnäyttöpaneelistä (Yritys X 2010). Voimalaitoksen valvomossa on lähes samanlainen ohjausnäyttöpaneeli. Näytöllä on esitetty hautomoaltaiden pinnan korkeus ja lämpötila, mitkä venttiilit ovat auki tai kiinni, mitkä pumput ovat päällä sekä mahdolliset häiriötilanteet. Valvomon näytöllä on nähtävissä myös yksittäistä putkilinjaa koskeva veden virtaama ja lämpötila.

8.3 Putkistoyhteydet hautomoaltaiden ja savukaasupesureiden välillä

Savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välillä virtaava vesi kiertää putkilinjoja pitkin osittain ulkona, rakennusten seiniin kiinnitettynä, voimalaitoksen tiloissa ja vaneritehtaan sisätiloissa vaihtelevissa korkeuksissa. Toistaiseksi savukaasupesureilla vedet kiertävät vain suljetussa kierrossa, joten pesureilla ei ole normaalitilanteessa tarvetta vedenpoistoon. Hautomoaltaiden ja savukaasupesureiden välillä on tietyt pääputkilinjat, joissa vesi kiertää. Tavanomaisesti arinakattilan savukaasupesurilta lauhdevedet ohjautuvat tiettyyn hautomoaltaaseen ja kiertopetikattilan savukaasupesurin lauhdevesi vastavuoroisesti ohjataan toiseen tiettyyn hautomoaltaaseen. Suodatettua hautomoallasvettä pumpataan imuputkiston kautta kiertovesipumpulla (kuva 13) takaisin kiertoon savukaasupesureille puhdistamaan ja lauhduttamaan kuumia savukaasuja.



Kuva 13. Hautomoaltaan imuputkistosta vettä savukaasupesurille pumppaava kiertovesipumppu

Putkilinjoissa on läppäventtiilit, joilla vettä voidaan ohjata ja johtaa putkilinjasta toiseen, hautomoaltaalta kummalle tahansa savukaasupesurille tai pesureilta mille tahansa kolmesta hautomoaltaasta veden- ja lämmöntarpeen mukaan. Vaneritehtaan sisätilassa on tasannealue, jossa virtaavan veden reittiä putkistossa voi muuttaa venttiileillä

manuaalisesti. Putkiin on merkattu selkeästi mihin suuntaan ja mistä mihin putken sisällä virtaava vesi liikkuu.

Tarkasteltavat putkilinjat oli paikoin hankala löytää muiden putkien joukosta. Tehtaan sisätiloissa joissakin kohdissa putket katoavat näkyvistä tuotantolaitteistojen taakse tai sisäkaton läpi tahdasrakennuksen ulkopuolelle, niin että kävellen lattiatasolta niiden reitti on kokonaisuudessaan mahdoton paikantaa. Kartoituskierrosten aikana näkyvyys hautomoaltaiden läheisyydessä oli paikoin erittäin huono lämpimän vesihöyryn takia (kuva 14), eikä pesurilta tulevan putken purkupäätä voinut paikantaa.



Kuva 14. Hautomoaltaan katettua sisätilaa

8.4 Vesikierron energiavirrat

Savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välisiä energiavirtoja ovat

- savukaasupesurin tornista lähtevän virtaavan veden lämpöenergia
- hautomoveteen siirtyvän veden lämpöenergia
- hautomoveden veden virtaus ja sen sisältämä lämpöenergia
- hautomoaltailta savukaasupesurin torniin palaavan veden lämpöenergia.

Savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välillä kiertävän veden lämpötilat vaihtelevat noin 35-65 °C-asteen välillä. Vesi siis pysyy koko ajan nestemäisessä olomuodossa. Veden tiheys ja ominaislämpökapasiteetti pidetään vähäisen lämpötilojen vaihtelueron takia tässä työssä vakiona. Molempien savukaasupesureiden piipussa on lämpötilamittari, jonka perusteella tässä työssä arvioitiin pesurilta kiertoan lähtevän veden lämpötila. Piippujen ja hautomoaltaiden lämpötila on nähtävissä jatkuvatoimisesti voimalaitoksen

valvomon monitorilta. Ne ovat siis voimalaitoksen automaatiojärjestelmään yhdistettyjä sähköisiä lämpötilamittareita.

Hautomoaltaan ja savukaasupesurin välillä kiertävään veteen sitoutunut lämpöenergia voidaan määrittää lämpövirran kaavan (8) avulla. Lämpövirran määrittäminen vaatii tiedon veden tilavuusvirtauksesta, lämpötilaerosta lähtevän ja tulevan veden välillä sekä veden ominaislämpökapasiteetista, joka on siis tässä työssä vakio $4,19 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$. Veden tiheyden arvona on käytetty lukemaa 997 kg/m^3 . Kyseessä on suljettu systeemi, jossa energia vaihtuu ympäristön kanssa, mutta aine ei. Savukaasupesureilta poistuvan veden lämpötila on $50\text{--}65^\circ\text{C}$. Hautomoaltailta savukaasupesureille menevän veden lämpötila on noin $35\text{--}60^\circ\text{C}$. Lämpö siirtyy konvektiolla lämpimän virtaavan veden mukana sekä johtumalla lämpimistä kohdista kylmempiin kohtiin tai ympärillä vallitsevaan kylmään aineeseen. Lämmin kappale lähettää enemmän lämpösäteilyä kuin ottaa kylmemmästä ympäristöstä vastaan. Lämpö siirtyy aina korkeasta lämpötilasta matalaan lämpötilaan. Täten ulkolämpötilan vaihtelut vaikuttavat jonkin verran putkessa virtaavan veden lämpötilaan.

8.5 Vesikiertoprosessin toteutus tulevaisuudessa

PIPO-asetuksen määräysten ja suositusten mukaisesti nykyisestä savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden välisestä vesikiertoprosessista luovutaan ja siihen tullaan tekemään muutoksia. Muutoksella on voimalaitoksen energiatehokkuutta parantava vaikutus. Vesikierron tullaan erottamaan toisistaan lämmönvaihtimilla, eikä savukaasujen lauhdevettä enää suoraan johdeta hautomoaltaisiin. Osa savukaasupesureiden kiertovedestä johdetaan lauhteiden käsittelyjärjestelmään, joka varustellaan asianmukaisilla ja suorituskykyisillä vedenpuhdistusmenetelmillä ja -laitteistoilla. Viemäriin ja sitä kautta vesistöön johdettavia vesiä valvotaan PIPO-asetuksen mukaisesti sekä jatkuvatoimisesti että säännöllisin mittauksin, riippuen tarkasteltavasta suureesta ja ainepitoisuudesta. (Voimalaitos X 2020b.)

Normaalitilanteessa kaikki savukaasupesureiden lauhdevedet johdetaan lauhdevedenkäsittelyjärjestelmään, joka on kytketty automaatiojärjestelmään. Lauhteenkäsittelyjärjestelmän mitoitus on tehty niin, että se kykenee käsittelemään molemmilta pesureilta tulevan poistettavan lauhdeveden sekä tarvittaessa hautomoaltailta johdettavaa ylijuoksutusvettä. (Voimalaitos X 2020a.) Enempää tähän vesikierron muutosuudistukseen ei tässä työssä paneuduta.

9 TULOKSET JA TULOSTEN ANALYSOINTI

9.1 Putkilinjakartoitukset ja mittaukset

Kierrokset tehtaan ja voimalaitoksen tiloissa toteutettiin marras-joulukuussa yksittäisinä päivinä. Näiden kierrosten aikana kartoitettiin savukaasupesureiden ja hautomoaltaiden väliset putkireitit niiltä osin kuin se oli kävellen ja turvallisesti mahdollista toteuttaa. Kierroksien yhteydessä mitattiin putkikokoja ja putkissa virtaavan veden lämpötilaa infrapumittarilla sekä selvitettiin mahdollisten olemassa olevien mittauslaitteiden sijainti. Ensimmäisellä kartoituskierröksellä mukana oli voimalaitoksen toimihenkilö. Muutoin tiloissa kiertely tapahtui itsenäisesti voimalaitoksen valvomoon asiasta ilmoittamisen jälkeen.

Savukaasupesureilta lähtevän lauhdeveden lämpötila oletettiin likimain samansuuruiseksi kuin savukaasupesureiden piipuissa olevat lämpötilamittarit osoittivat. Lämpötila-arvot kysyttiin valvomon henkilökunnalta, jolloin selvisi senhetkiset monitorilla näkyvät lukemat. Samoin kierrätysvesipumppujen tietokilpiin merkatut tilavuusvirtalukemat toimivat oletuksena putkilinjoissa virtaavalle vedelle. Kartoituskierrösten yhteydessä pumppujen tietokilvistä otettiin kuvat ja kuvista kirjattiin ylös tilavuusvirtalukemat ja muita työn kannalta mahdollisesti tarpeellisia tietoja. Joidenkin tietokilpien kohdalla tuotti vaikeuksia saada numeroarvoista selvää tietokilven pinnan kulumien takia. Tilavuusvirtoja ei ollut mahdollista tämän työn puitteissa selvittää ja mitata tarkemmin.

Yhdessä putkilinjassa paikannettiin sijaitsevan paikallinen lämpötilan mittauspiste, josta ei välity tietoa sähköiseen tietojärjestelmään. Tämä mittauspiste sijaitsee voimalaitoksen sisätiloissa (kuva 15) aivan valvomon läheisyydessä. Lämpötilan mittausalue on 0-300 °C ja mittarin anturi on suoraan yhteydessä virtaavaan veteen.



Kuva 15. Paikallinen lämpötilan mittauspiste voimalaitoksen sisätiloissa valvomon vieressä

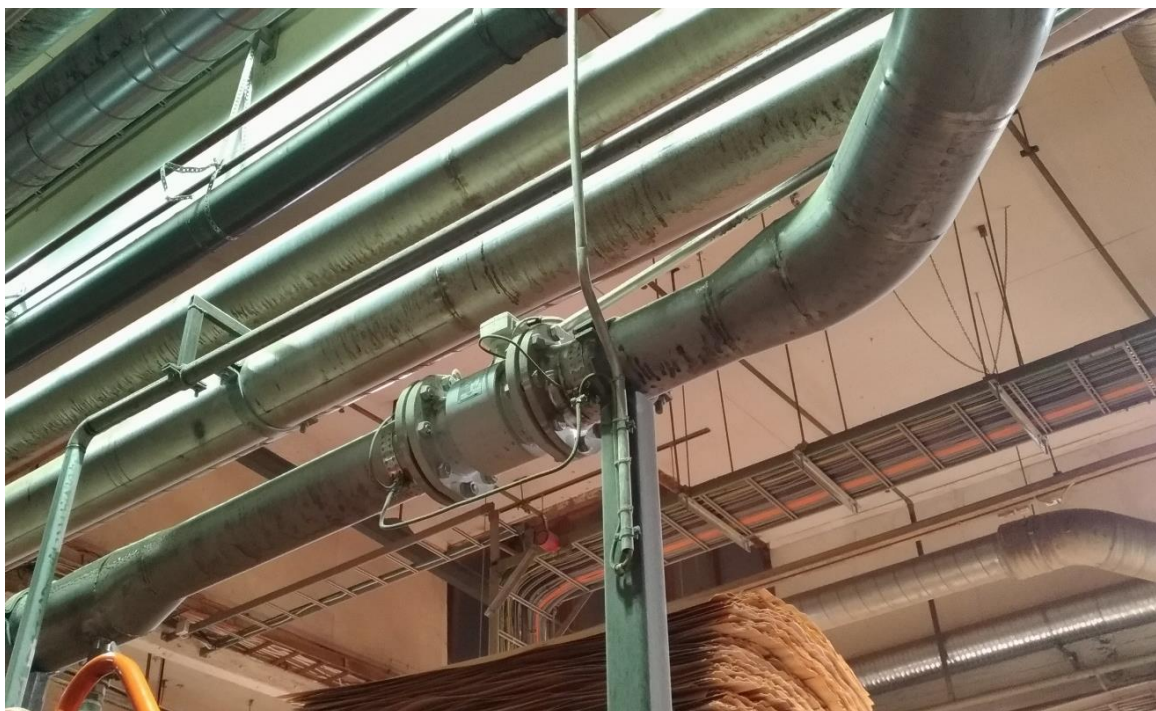
Virtaavan veden lämpötilaksi infrapunalämpömittarilla suoraan veteen osoitettuna saatiin likimain 48 °C. Putken lämpötilamittarissa lukema näytti tasan 50 °C. Mittari siis näyttää lähes ajantasaisen tuloksen lämpötilalle. Putken sisäpinnassa oli paksuhko kerros likaa, joka osoitti, että virtaava lauhdevesi on epäpuhdasta ja aiheuttaa putkistoon likakertymää (kuva 16). Tämäntyyppistä likakertymää on putkien sisäpinnoilla vaihteleva määrä ja se alentaa putkistojen pinnasta otettavien mittausten luotettavuutta, oletettavasti hyvin merkittävästikin.



Kuva 16. Virtaavan veden mukana kertynyttä likaa putken sisäpinnalla

Kartoituksen yhteydessä selvisi, että jokaisessa hautomoaltaassa on oma lämpötilan mittausanturi, joista mittausdata välittyy voimalaitoksen monitorille. Mittareiden fyysistä sijaintia ei kyetty kartoituksen aikana paikantamaan hautomoaltaiden läheisyydessä vallinneen huonon näkyvyyden takia. Yhdellä hautomoaltaalla huomattiin, että jokin lämpötila-anturi oli kierretty altaan päällä olevan kävelytasanteen kaiteen ympärille ja anturi oli ilmassa, eikä täten mitannut laisinkaan hautomoaltaan veden lämpötilaa. Infrapunalämpömittarilla mitattiin lämpötila hautomoaltaiden veden pinnasta ja sitä verrattiin voimalaitoksen valvomon monitorilla näkyvään arvoon. Monitorilla näkyvä tulos vaikutti luotettavalta, joten sitä hyödynnettiin energialaskuissa.

Yhteen putkilinjaan on asennettu virtausmittari (kuva 17), jonka yhteydessä on ilmeisesti myös lämpötilan mittausinstrumentti. Putkilinjassa ei tarkasteluajankohtana kiertänyt vettä, joten mittariin yhteydessä olevassa näytössä näkyi vain teksti "Error" ja valvomon monitorissa virtauslukema näyttikin arvoa 0 m³/h. Virtausmittarin tyypistä ei saatu tarkkaa tietoa. Mittausdata on luettavissa paikalliselta näytöltä ja mittausdata ohjautuu sähköisesti myös valvomoon. Tällainen virtausmittari olisi oikein hyvä lisä muihinkin päälinjoihin.



Kuva 17. Virtausmittari putkilinjassa tehtaassa sisällä

Lämpötilaa ei kyetä mittaamaan infrapunälämpömittarilla suoraan putken pinnasta luotettavalla tasolla, sillä putkissa on kiertoveden epäpuhtauksien takia likakertymää, putkien ulkopinnat estävät jonkun verran lämpöä johtumasta ulos päin ja virtaava vesi on koko ajan liikkeessä, jolloin lämpötila vaihtelee tietyssä kohtaa jatkuvasti. Ulkolämpötilan ollessa alhainen, ulkotilassa olevan putken ulkopinta on kylmä ja sen sisällä virtaavan veden lämpötila jäähtyy ja pääsee tapahtumaan lämpöhäviöitä. Lämpötila kun pyrkii aina tasautumaan lämpimästä kylmempään.

Tulokset tehdas- ja voimalaitoskierroksen aikana talteen kirjatusta lämpötilamittauksista ja putkien ulkohalkaisijan selvityksistä sekä niiden perusteella tehdyistä DN-putkikokoarvoista taulukoitiin ja toimitettiin erillisenä liitetiedostona toimeksiantajan käyttöön. Taulukoon lisättiin myös maininta lämpötilan mittauspaikasta ja muista huomioitavista asioista.

9.2 Virtaavan veden sisältämän energiamäärän arviointi

Energiavirtojen suuruudet arvioitiin olemassa olevien lämpötilamittausten, kartoitusten yhteydessä tehtyjen lämpötilamittausten ja tiettyjen olettamusten pohjalta. Putkilinjoissa virtaavat tilavuusvirrat oletettiin vastaavan likimain kierrätysvesipumppujen nimellistuottoa. Tarkempaa tilavuusvirran mittausta ei tämän työn yhteydessä toteutettu, joten muutakaan vaihtoehtoa ei käytännössä ollut. Virtaavan veden mukana kulkevat energiamäärät laskettiin virtauksen ja lämpöenergian laskukaavoilla, jotka esiteltiin edellä tässä työssä

(kappaleessa 6). Laskut on tehty tehdas- ja voimalaitosympäristössä yksittäisinä leutoina talvipäivinä suoritettujen mittausten pohjalta.

Laskennassa käytettiin massan tilalla massavirtoja (q_m) ja tiheyden (ρ) ja tilavuusvirran (q_v) tuloa. Lämpöenergiamäärät laskettiin lämpövirran (ϕ) kaavalla (8), joten tulokseksi saatiin lämpötehoarvoja ja yksiköksi watteja [W]. Lämpövirta laskettiin molemmilta savukaasupesureilta lähteviltä putkilinjoilta sen mukaan, minne hautomoaltaaseen vesi kyseisenä tarkasteluajankohtana ohjattiin ja samoin laskettiin lämpövirta hautomoaltaalta takaisin savukaasupesurille vievän putkilinjan osalta. Lämpötilan muutoksella (Δt) tarkoitetaan tässä yhteydessä lähtevän ja tulevan veden lämpötilan muutosta putkilinjassa. Muutosarvo riippuu siitä, mistä kohti lämpötila on saatu putkilinjalla mitattua. Energialaskuissa käytettiin kartoituskierrosten aikana selvitettyjä ja myöhemmin tietokoneella taulukoituja lämpötila-arvoja. Samaan taulukkoon yhdistettiin lämpökapasiteetti- (C) ja lämpömäärä-laskut (Q) savukaasupesureille ja hautomoaltille. Saadut tulokset ovat arvioita ja havainnollistavat, minkä suuruisia energiamääriä veteen voi olla sitoutuneena, kun veden lämpötilalukema on taulukossa esitetyn mukainen.

9.3 Mahdollisten mittauspisteiden sijoittuminen

Teollisissa prosesseissa on energiavirran määrittämiseksi sijoitettava lämpötilan mittaustinstrumentti tulevan ja lähtevän veden lämpötilaeron selvittämiseksi. Savukaasupesurilta lähtevän putkilinjan alkupäähän tulisi sijoittaa lämpötilamittari ja hautomoaltaalta saapuvan veden lämpötila tulisi olla mitattavissa savukaasupesurille saapuvan putkiston loppupäästä. Tämä toteutettaisiin molemmille pesureille ja mittarit olisivat sellaisia, että mittausdata saadaan yhdistettyä suoraan valvomoon. Hautomoaltilta savukaasupesureille pumpattavasta virtaavasta vedestä voisi mitata tarkemman lämpötilan mitä altaan oma lämpötilamittari antaa olettaa, jotta sitä voidaan verrata tulokseen savukaasupesurille saapuvasta virtaavasta vedestä mitattavaan lämpötilan arvoon, eli selvitetäisiin lämpötilaero.

Lämpötilamittareiden lisäksi vesikiertoprosessiin voisi lisätä päälinjakohtaiset automaatiojärjestelmään yhdistettävissä olevat virtausmittarit, jotta saadaan tarkempaa tietoa veden virtausnopeudesta ja mahdollisista virtausvastuksista. Kierrätysvesipumppujen tuotoista tehdyt tilavuusvirtojen oletusarvot eivät anna luotettavaa ja ajantasaista tietoa.

Energiavirtojen tehokas seuranta ja hallinta vaatii tarvittavat komponentit ja käyttökonekunnan tarvittavan osaamisen ja kyvyn reagoida muutoksiin. Mittausten automaatiojärjestelmään liittäminen edesauttaa energiatehokkuuden seurantaa reaaliajassa ja lämpövirtojen ohjaus tarvittaviin prosesseihin on mahdollista. Energiatehokkuussopimuksissa

kannustetaan uuden teknologian rohkeaan käyttöön, eli mittauslaitteisto on suositeltavaa olla nykytekniikan mukaista. Tarkkoja mittauspisteiden sijaintikohtia ei tämän työn tulokseksi voida esittää. Se tulee arvioida toimeksiantajan taholta.

9.4 Sankey-diagrammi

SankeyMATIC-ilmaisverkkotyökalulla luotiin kaksi Sankey-diagrammia. Savukaasupesureilta hautomoaltaille virtaavien vesien mukana kulkeutuvat lämpövirrat (veden luovuttaman energian määrä) esitetään toisessa kaaviokuvassa ja toisessa kaaviokuvassa on kuvattu hautomoaltailta takaisin pesureille virtaavan veden lämpövirran arvo. Kaaviokuvien yhdistettiin lisäksi pesureilta ja hautomoaltailta muualle johdettavien vesien mukana siirtyvä lämpöteho, mutta niitä ei eritelty sen tarkemmin tässä työssä. Siirtyvä lämpöenergia päätettiin esittää kaaviokuvissa lämpötehona, yksikössä megawatti (MW), toimeksiantajan toiveen mukaisesti.

Täytyy huomioda, että kaaviokuvien lämpöteholukemat ja virtojen jakautuminen ovat arvioita. Tulokset saatiin Excel-taulukkoon syötettyjen yksittäisten putkilinjojen lämpötila-arvojen ja kierrätysvesipumppujen tuotosta oletettujen tilavuusvirta-arvojen perusteella tehtyjen laskujen pohjalta. SankeyMATIC-työkalulla ei pysty rivittämään tekstiä, eikä yksiköille ole varattu erillistä sijoituspaikkaa, joten lopputuloksesta tuli pelkistetympi mitä aluksi suunniteltiin. Sankey-kaaviot on toimitettu erillisenä liitetiedostona toimeksiantajalle.

9.5 PI-kaavio

Olemassa olevista putkilinjoista piirrettiin rajallisen taitotason puitteissa AutoCAD Plant 3D (Student License) -piirto-ohjelmistolla ja siihen sisältyvällä P&ID-suunnittelutyökalulla tarkempi ja informatiivisempi PI-kaavio (toimeksiantajan käyttöön) hyödyntäen yleisiä ohjeistavia standardeja ja toimeksiantajan omia kaaviomerkinäytöksiä. PI-kaavio ei ole täysin standardien mukainen ja piirto-ohjelmiston oppilaslisenssiversiolla ei kyetä tekemään tiettyjä asetusmuutoksia, kuten muutoksia putkilinjatunnusten merkinäytöksiin. Kaavioon voisi lisätä vieläkin enemmän tietoja ja erityisesti instrumentoinnin osalta kaaviokuva on puutteellinen. Kaavioon on sijoitettu tietoja, jotka saatiin tutkimusajan puitteissa selvitettyä.

PI-kaavioon lisättiin muun muassa putkilinjatunnukset, pumppujen, venttiilien ja kartoitettujen mittalaitteistojen sijainti sekä prosessin päälaitteiden tietoja. Putkikoot on esitetty putkilinjamerkinnöissä sen koon mukaan, mitä kokoluokkaa putkilinja suurimmaksi osaksi edustaa. Putkilinjoissa oli havaittavissa kokovaihteluita pitkin putkistoyhteyksiä, mutta näitä kokovaihteluita ei koettu olevan järkevää lisätä PI-kaavioon, sillä kaaviokuvasta olisi tullut epäselvä. Putkilinjoista laadittiin lisäksi yksinkertaistettu putkilinjaluetelo.

10 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Teollisissa prosesseissa syntyy valtavia määriä ylijäämäenergiaa, joka kannattaa ehdottomasti käyttää hyödyksi muissa teollisuuslaitoksen prosesseissa. Ylijäämälämpöä kannattaa hyödyntää ensisijaisesti samassa prosessissa tai tuotantolinjassa, jossa ylijäämälämpö syntyy. Ylijäämälämpö voidaan ohjata kauemmaksikin syntypaikastaan, mutta tällaisen hyödyntämiskäytännön kannattavuutta tulee harkita perusteellisesti. Mitä kauemmas lämpöä joudutaan siirtämään syntypaikastaan, sitä kalliimpia ovat lämmönhyödyntämisinvestoinnit.

Tässä selvityksessä tarkastelussa on voimalaitoksen savukaasujen jäähdytysvesien hyödyntäminen ylijäämälämmönlähteenä toisen teollisuuslaitoksen prosessissa. Savukaasujen jäähdytysvedessä on ylijäämälämpöä, joka on kannattavaa hyödyntää tehtaan prosesseissa ennen kuin vesi johdetaan viemäriin. Lämmönlähteenä savukaasupesureiden lauhdeveteen liittyy haasteina veden matala lämpötila ja epäpuhtaudet. Lämmintä prosessivettä pyritään kierrättämään mahdollisimman paljon ennen kuin se johdetaan viemäriin, mikäli prosessi sen sallii. Loputtomiin likaista vettä ei voi kuitenkaan kierrättää, siitä aiheutuu lopulta vain ongelmia. Likakerrokset aiheuttavat herkästi tukkeumia ja vikaantumista prosessilaitteistossa, mikä johtaa tuotantokatkoksiin ja ylimää räisiin kustannuksiin.

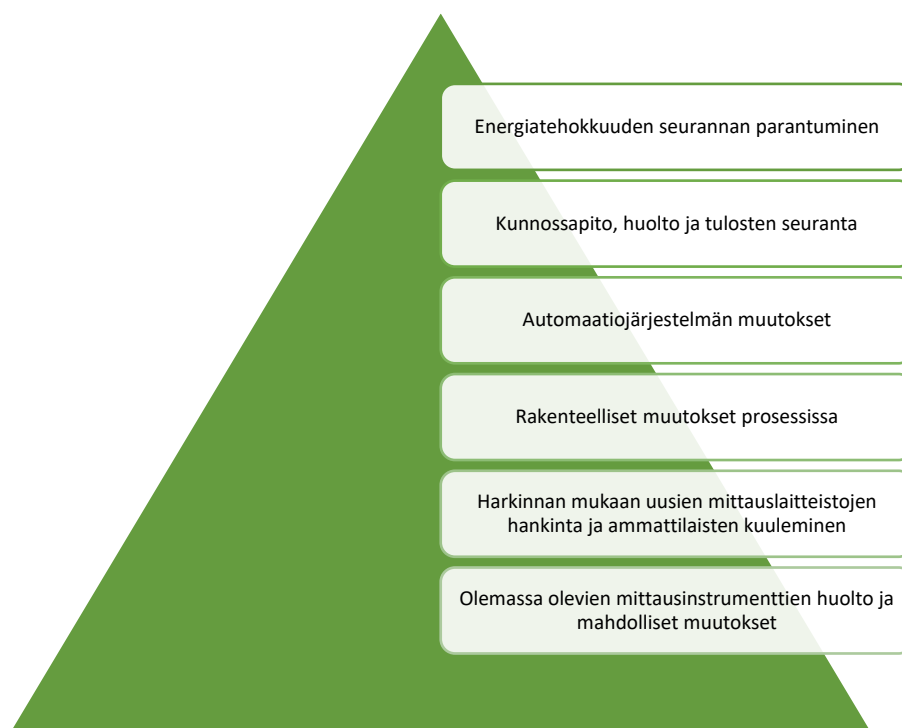
Ennen kuin energiamääriä ja energiatehokkuutta päästään tarkastelemaan on mitattava lämpötilaa ja virtausnopeutta, joiden perusteella on mahdollista laskea energiamääriä. Nämä mittaustulokset on jalostettava käyttökelpoiseen muotoon niin, että nähdään energiamäärät automaatiojärjestelmän laskentaohjelman mahdollistamana suoraan valvomonitorilta. Mittauksilla ja mittausten seurannalla on merkitystä, jos mitatut luvut jalostetaan prosessin ohjaajalle käyttökelpoiseen muotoon. Mittaustulosten ansiosta saadaan tietoon vesikierron kehittämiskohteita, rakenteellisia ongelmia tai tietoa yksittäisten laitteiden toimivuudesta tai toimimattomuudesta. Digitaalisten ratkaisujen ja data-analytiikan hyödyntämistä energiatehokkuuden parantamisessa pidetään prosessi- ja kunnossapitohenkilöstön keskuudessa kannattavana ja suhtautuminen siihen on myönteistä.

Energiankulutuksen seuraamiseksi työssä tarkasteltavana olevissa putkilinjoissa tulisi olla mittausräimentit lähtevän ja tulevan väliaineen lämpötilan mittaamiseksi, eli tässä tapauksessa savukaasupesurilta ja hautomoaltaalta lähtevälle vedelle ja sinne palaavalle vedelle, samoin kuin tehtaan lämmöntalteenottotornien yhteydessä on lämpötilamittari tulevaa ja lähtevää poistoilmaa mittaamassa. Lämpötilamittaus antaa tiedon prosessiaineen lämpötilasta, minkä perusteella prosessia voidaan valvoa ja ohjata edelleen toivottuun suuntaan. Automaatiojärjestelmään liitetty mittausdata voisi ohjata putkilinjoissa olevien mittausten perusteella lauhdevesikierron pumppuja, jolloin virtausnopeuksia saadaan

säädettyä lämpötilan mukaan automaattisesti ja tätä kautta säästettyä energiaa. Tehtaalla on kokemusta lämpöpumppujen ja lämmönvaihdinten käytöstä, joten mittaus- ja lämmön- talteenottolaitteiston hankinnassa ja hyödyntämisessä tuskin on ongelmaa.

Putkilinjojen kartoituksen yhteydessä ilmeni, että putkien kunnossapidossa on parannettavaa. Putkilinjoissa on likakertymää, putkia on paikkailtu ja putkien kallistuskulmat ovat paikoin puutteelliset. Voimalaitoksen alasajojen ja tuotantoseisokkien aikana vesi jäätyy herkästi putkiin, sillä kallistuskulmat eivät ole riittävät. Nykyisten mittauslaitteistojen toiminta tulisi tarkastaa ja tarpeen mukaan korjata, ennen kuin uusia mittauslaitteistoja suunnitellaan hankittavaksi. Putket ovat olleet käytössä jo pitkään, toistakymmentä vuotta, joten putkilinjat olisi syytä puhdistaa ja huoltaa huoltoseisokkien yhteydessä, kun kattilat ja savukaasupesurit on ajettu alas ja putkissa ei virtaa vettä. Luotettavaa mittaustulosta ei saada, jos putken sisäpinnoilla on likavastusta.

Olemassa olevien ja tulevaisuudessa mahdollisesti hankittavien uusien mittalaitteistojen kunnossapidosta ja kalibroinnista on huolehdittava säännöllisesti. Keskinäinen vuoropuhelu on tärkeää ja olisi hyvä, jos energiatehokkuuden tehostamiseen ja sen ylläpitoon osallistuisi jokainen työntekijä omalla kohdallaan sen mukaan mitä kykenee havaitsemaan omassa työnkuvassaan, kehitystoimenpiteet tuodaan ilmi ja niihin pyritään löytämään ratkaisuja mahdollisimman nopeasti. Oheiseen kuvaan (kuva 18) on koottu energiatehokkuuden seurannan parantumiseen johtavia toimenpiteitä.



Kuva 18. Energiatehokkuuden seurannan parantumiseen johtavat toimenpiteet

Työn toteutuksen aikana selvisi, että voimalaitoksella on tapahtumassa muutoksia PIPO-asetuksen tiukentuneiden määräysten takia. Voimalaitoksen savukaasupesureiden lämmintä lauhdevettä ei enää jatkossa tulla johtamaan suoraan hautomoaltaisiin. Tämä hankaloitti hieman tekemistä, sillä tarkastelussa oli nykyinen olemassa oleva tekniikka ja prosessin toiminta sekä samaan aikaan arviot siitä mitä tulevaisuudessa vesikiertoprosessissa tulee tapahtumaan. Tekijälle työstä oli hyvin paljon hyötyä, sillä uutta opittiin monelta eri kantilta: voimalaitos- ja prosessitekniikkaan liittyvistä asioista, käytännönläheisistä mitauksista, kartoituksista ja laskuista, tulosten jalostamisesta Sankey-kaavioksi ja PI-kaaviokuvan laadinnasta olemassa olevaan vesikiertoprosessiin liittyen.

LÄHTEET

Painetut lähteet:

Hautala, M. & Peltonen, H. 2014. Insinöörin (AMK) Fysiikka Osa 1. Lahden Teho-Opetus Oy. Saarijärvi: Saarijärven OFFSET Oy.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Opetushallitus. Keuruu: Otavan kirjapaino Oy.

Perttula, J. 2000. Energiatekniikka. Porvoo: WS Bookwell Oy.

Elektroniset lähteet:

Aho, J., Hietämäki, E., Hyytiä, H. & Jalovaara, J. 2003. Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) 5-50 MW:n polttolaitoksissa Suomessa. Suomen ympäristökeskus [viitattu 26.10.2019]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40560/SY_649.pdf?sequence=1

Babcock & Wilcox 2019. Collecteurs de poussières Multiclone [viitattu 28.11.2019]. Saatavissa: <https://www.babcock.com/fr-fr/products/multiclone-dust-collectors>

CR Clean Air 2019. Packed tower scrubber [viitattu 28.11.2019]. Saatavissa: <https://www.crcleanair.com/products/the-jet-venturi-scrubber/>

Ehox Tuote Oy 2019. Suihkupesuriprosessi. Ehox Tuote Oy: Tuotteet sahoille [viitattu 13.11.2019]. Saatavissa: http://www.ehox.fi/saha_pro.htm

Energiateollisuus & Ympäristöministeriö 2012. Kotimaista polttoainetta käyttävien 0,5... 30 MW kattilalaitosten tekniset ratkaisut sekä palamisen hallinta [viitattu 23.10.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/393/Pienten_polttolaitosten_palamisen_hallinta_loppuraportti.pdf

Engineering Toolbox 2003. Scrubber Basics. A schematic drawing of a typical spray nozzle scrubber [viitattu 29.11.2019]. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/scrubbers-air-washers-d_139.html

Finnish Consulting Group Oy (FCG) 2011. Sankeykaavio Dynean tehtaan sähköenergiakulutuksesta. Motiva – Energiakatselmusraportti: Teollisuuden energia-analyysi Dynea Chemicals Oy [viitattu 28.1.2020] Saatavissa: <https://docplayer.fi/48493004-Motiva-energiakatselmusraportti-teollisuuden-energia-analyysi.html>

Honold, A. 2019. The What, Why, and How of Sankey Diagrams. Showing resource flows intelligently. Towards Data Science [viitattu 2.11.2019] Saatavissa: <https://towardsdatascience.com/the-what-why-and-how-of-sankey-diagrams-430cbd4980b5>

Ifu Hamburg 2019. The No. 1 tool for creating Sankey diagrams [viitattu 1.10.2019]. Saatavissa: <https://www.ifu.com/en/e-sankey/>

Järvenreuna, J. & Nummila, M. 2014. Nykyaikainen savukaasupesuri – merkittävä biolämpölaitosten kannattavuuden parantaja [viitattu 21.10.2019]. Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf

KnowEnergy 2019. Luonnonkiertokattilan periaate [viitattu 15.10.2019]. Saatavissa: http://www.knowenergy.net/suomi/monipoltti_kattilat/5_0_hoyrykatt_periaate/frame.htm

Lehtilä, A., Ohlström, M., Raunemaa, T. & Tsupari, E. 2005. Pienhiukkaspäästöt ja niiden vähentämismahdollisuudet Suomessa [viitattu 14.10.2019]. VTT Tiedotteita. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2300.pdf>

Lähteenaro, P. 2018. Pesulateollisuuden energiatehokkuuden parantaminen [viitattu 31.10.2019]. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. Saatavissa: <https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158587/L%C3%A4hteenaro%20Paavo%20Pesulateollisuuden%20energiatehokkuuden%20parantaminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Motiva Oy 2019. Esiselvitys: Ylijäämälämmön potentiaali teollisuudessa [viitattu 20.10.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/16214/Esiselvitys_-_Yljaamalammon_potentiaali_teollisuudessa.pdf

Motiva Oy 2016. Energiatehokas lämmönsiirto [viitattu 19.11.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/11106/Energiatehokas_lammonsiirto.pdf

Motiva Oy 2014. Energiatehokkuuden mittaus- ja seurantajärjestelmän hankinta [viitattu 23.11.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/9845/Energiatehokkuuden_mittaus-ja_seurantajarjestelman_hankinta.pdf

Motiva Oy 2012. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmä: Energiatehokkuuden mittausopas [viitattu 25.10.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/8898/Hoyry-lauhdesiirtojarjestelman_energiatehokkuuden_mittausopas_verkkoon.pdf

Motiva Oy 2011. Höyry-lauhde-siirtojärjestelmä. Käyttö- ja kunnossapitohenkilökunnan ohjeistus [viitattu 15.10.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/8897/HOLA_kaytto-kunnossapito_ohjeistus_2011.pdf

Pöyry 2017. Savukaasupesureiden luvituskäytännöt ja jätevesien ja lietteiden ympäristövaikutukset. Energiateollisuuden ympäristötutkimusseminaari [viitattu 20.1.2020]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/38761041-Savukaasupesureiden-luvituskaaytannot-ja-jatevesien-ja-lietteiden-ymparistovaikutukset-energiateollisuuden-ymparistotutkimusseminaari-kirsi-koivunen.html>

Renewa Oy 2015. ReneGrate Arinakattila [viitattu 14.12.2019]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/4448067-Renewa-oy-lampolaitokset.html>

Rinne, S. 2018. Uusi PIPO-asetus (asetus keskisuurten energiantuotantoyksiköiden ja -laitosten ympäristönsuojeluvaatimuksista 1065/2017) [viitattu 17.12.2019]. Saatavissa: <http://www.ely-keskus.fi/documents/10191/35986860/PIPO-asetus+Sami+Rinteen+esitys/c84d1249-6f25-4655-ab17-a14b0c29ca39>

River Glennapts 2019. Arbeitsprinzip des elektrostatischen Abscheiders [viitattu 2.12.2019]. Saatavissa: <https://riverglennapts.com/en/electrostatic-precipitator/383-working-principle-of-electrostatic-precipitator.html>

Taulukot.com (taulukkokirja netissä) 2020. Fysiikan kaavoja [viitattu 14.3.2020]. Saatavissa: https://www.taulukot.com/fysiikka/fysiikka_kaavoja/

Timonen, J. 2009. Oppimateriaali: Höyrykattila ja sen toiminta voimalaitoksen osana [viitattu 20.10.2019]. AMK opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu, kemiantekniikan koulutusohjelma. Tampere. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/8556/Timonen.Jere.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Muut lähteet:

PSK 3602, 2008. PI-kaavion tietosisältö. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry

PSK 3603, 2012. PI-kaavion esitystapa ja merkitsemisohje. Helsinki: PSK Standardisointiyhdistys ry

Tekijä X 2009. Voimalaitos X:n esittely. PowerPoint-diaesitys. Yritys X:n tietokanta.

Voimalaitos X 2016. Hakemus ympäristöluvan lupamääräysten tarkistamiseksi. Aluehallintovirasto: Lupa-Tietopalvelu.

Voimalaitos X 2020a. Voimalaitos X, savukaasupesurin lauhdevesien käsittely (täydennys). Aluehallintovirasto: Lupa-Tietopalvelu.

Voimalaitos X 2020b. Voimalaitos X, savukaasupesurin lauhdevesien käsittely (selvitys). Aluehallintovirasto: Lupa-Tietopalvelu.

Yritys X 2010. Hautomoaltaiden vesien käsittely. Word-tiedosto. Yritys X:n tietokanta.

Yritys X 2018. Tuotantolaitosesittely: Yritys X. PowerPoint-diaesitys. Yritys X:n tietokanta.